

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

Допущений до захисту:
завідувач кафедри
д.т.н., професор Севостьянов І.В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2021 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРОСЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ
ВІД ЛЕГКИХ ДОМШОК**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 61-МП-маг
Воловодівський Віктор Русланович

Керівник: доктор філософії, ст. викл.
Бурлака Сергій Андрійович

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Кафедра технологічних процесів
та обладнання переробних і
харчових виробництв

Інженерно-технологічний
факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри

д.т.н., професор Севостьянов

І.В.

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту Воловодівському Віктору Руслановичу

на тему

«Дослідження процесу вібросепарації зернової суміші від легких домішок»

затверджену Наказом від «___» _____ 2021 року №

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План-проспект магістерської роботи.
3. Підручники та навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТІ).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних за попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Об'єм, стор.	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		2	Листопад 2021 року	
Вступ		2	Листопад 2021 року	
Розділ 1	Аналіз процесів та обладнання для очищення зерна від домішок	14	Листопад 2021 року	
Розділ 2	Математичне моделювання руху зернового потоку на віброуючій	38	Листопад 2021 року	
Розділ 3	Дослідження процесу зсуву зернової маси	17	Листопад 2021 року	
Розділ 4	Ефективність використання запропонованого способу	3	Листопад 2021 року	
Висновки		2	Листопад 2021 року	
Список використаної літератури		10	Квітень 2021 року - листопад	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту «_____» _____ 2021 р.

Завдання видано «14» березня 2021 р.

Завдання прийняв до виконання _____

Керівник _____ С.А. Бурлака доктор філософії, ст. викл.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Воловодівський В.Р. Дослідження процесу вібросепарації зернової суміші від легких домішок

Рукопис.

Магістерська робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2021р.

У зв'язку із засміченістю і не однорідністю зерна, що надходить з елеваторів, борошномельні підприємства змушені здійснювати його очищення від домішок і сортування перед подрібненням. Ефективність сепарування на проміжних стадіях подрібнення не тільки впливає на якість продукції і ступінь використання сировини, але визначає навантаження і ефективність роботи подальшого технологічного обладнання, а отже, продуктивність і техніко-економічні показники підприємства в цілому. Так, недоочищення дрібних фракцій в борошні, що надходять на ситові машини, не дозволяє встановити оптимальний повітряний режим. Недосів борошна, що надходить на помел, призводить до перевантаження вальцьового верстата і знижує якість борошна.

Однак, як показує практика, проблеми в очищенні зерна існують.

Вищесказане дозволяє зробити висновки, що підтверджують актуальність магістерської роботи:

- підвищення врожайності зернових культур залежить від якості насінневого матеріалу і відсутності в ньому сторонніх домішок;
- зерно з підвищеною засміченістю знижує якість борошна, використовуваної для виготовлення харчових продуктів і веде до зростання собівартості;
- вирішення проблеми зменшення домішок в зерні можливо шляхом вдосконалення процесів сепарування і використовуваної техніки.

SUMMARY

Volovodovsky V.R. Investigation of the process of vibroseparation of grain mixture from light impurities

Manuscript.

Master's thesis to obtain an educational qualification level

"Master" in the specialty 133 "Industrial Engineering".

Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, 2021

Due to the clogging and inhomogeneity of the grain coming from the elevators, flour mills are forced to clean it from impurities and sort before grinding. The efficiency of separation in the intermediate stages of grinding not only affects the quality of products and the degree of use of raw materials, but determines the load and efficiency of further technological equipment, and hence the productivity and technical and economic performance of the enterprise as a whole. Thus, the underperforming of small fractions in the flour supplied to sieve machines does not allow to establish the optimal air regime. Insufficiency of the flour arriving on a grinding leads to an overload of the roller machine and reduces quality of flour.

However, as practice shows, there are problems in grain cleaning.

The above allows us to draw conclusions that confirm the relevance of the master's thesis:

- increasing the yield of cereals depends on the quality of seed material and the absence of impurities in it;
- grain with high clogging reduces the quality of flour used for food production and leads to an increase in cost;
- solving the problem of reducing impurities in the grain is possible by improving the separation processes and techniques used.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА ВІД ДОМІШОК.....	10
1.1. Класифікація зернових домішок та способи їх видалення.....	10
1.2. Процеси та обладнання для очищення зерна від дрібних та легких домішок.....	14
1.2.1 Ситові сепаратори для очищення зерна	14
1.2.2. Пневмосепаруючі пристрої.....	16
1.2.3. Вібропневмосепаратори	19
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗЕРНОВОГО ПОТОКУ НА ВІБРУЮЧІЙ РИФЛЕНІЙ ПОВЕРХНІ.....	24
2.1. Дослідження робочого органу та опис процесу вібраційного переміщення зернової суміші	24
2.2. Двошарова модель сипучого тіла.....	27
2.2.1. Рух верхнього шару	28
2.2.2. Рух нижнього шару.....	44
2.3. Аналіз траєкторій частинок сипучого зернового потоку	59
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗСУВУ ЗЕРНОВОЇ МАСИ.....	63
3.1. Визначення коефіцієнтів опору зсуву шарів зерна	63
3.2. Дослідження ефективності процесу сепарування зерна.....	66
3.2.2. Методика дослідження.....	68
3.2.3. Аналіз отриманих результатів	70
3.3. Дослідження руху частинок верхнього шару	76
3.4. Середня швидкість руху частинок нижнього шару	79
РОЗДІЛ 4. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ.....	81
4.1. Видалення легких домішок.....	81
4.2. Видалення легких та важких домішок.....	82
4.3. Суміщення процесів сепарування та транспортування	83
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

ДОДАТОК А.....	93
ДОДАТОК Б.....	96

ВСТУП

Продукти харчування, вироблені з зерна пшениці займають істотне місце в раціоні харчування більшої частини населення нашої країни. Завдяки їм харчовий раціон населення забезпечується калорійністю на 40%, білками - на 50%, вуглеводами - на 60%. Ці фактори змушують висувати жорсткі вимоги до якості зерна. В першу чергу за засміченістю і вологістю, в другу за хлібопекарськими властивостями. Очевидно, що не існує способів, що дозволяють випускати високоякісні та корисні харчові продукти з низькоякісної зернової сировини. Практично встановлено, що простіше й економічно обґрунтовано використати якісну сировину (зернову партію, що відповідає вимогам ДСТУ), ніж намагатися усунути дефекти в процесі переробки некондиційної сировини (борошна).

Чистота зерна - один з найважливіших показників, що формують якість борошна і зернових продуктів.

Аграрії висувають жорсткі вимоги щодо якості очищення насінневого матеріалу зернових культур від домішок.

Необхідні результати щодо засміченості та однорідності насіння досягаються шляхом багаторазового повторення операцій очищення від домішок і калібрування зерна на зерноочисних машинах. В результаті великої кількості технологічних операцій з очищення відбувається пошкодження насінневого зерна. Частка пошкодження насіння зерноочисними та калібрувальними машинами становить від 25 до 50% від загальної кількості мікротравм. При цьому варто зазначити, що на травмування насіння зернозбиральною технікою припадає від 20 до 35%, а на посівні агрегати всього від 2 до 6%. Використання для посіву насіння пшениці з мікротравмами призводить до зниження врожайності в розмірі від 10 до 15%.

При посіві насіння пшениці, що пройшло якісне очищення від домішок і калібрування відбувається збільшення збирання врожаю. Так в результаті експериментів, проведених на сортовипробувальних ділянках в Харківській області, агрономами селекціонерами були отримані результати: схожість великого однорідного насіння на 5,7% вище а кількість збору рослин на 25% більше, ніж при посіві дрібним і легким насінням, як результат підвищення

врожайності до 4,5 ц/га.

На якість зерна після обробки на елеваторі істотно впливає: правильність підбору зерноочисних машин, якість технологічних процесів очищення і сушіння; формування однорідних партій зерна (партій насінневого зерна та зерна з найбільш високими технологічними властивостями). Оптимально сформовані на елеваторах зернові партії за масою і розмірами зернин в подальшому дозволяють більш точно налаштувати борошномельне обладнання.

Правилами організації та ведення технологічного процесу на борошномельних заводах встановлена гранично допустима засміченість зерна, яка повинна становити не більше 2%. За даними комбінатів зерно, що надходить на переробку, має фактичну засміченість сорною домішкою близько 2,5%. Слід зазначити, що в останні роки спостерігається підвищення засміченості зерна насінням дикорослих рослин, наприклад, такою важковіддільною домішкою як вівсюг призводить до перевантаження вальцювого верстата і знижує якість борошна.

Мета роботи. Підвищення якості очищення зерна від легких домішок за рахунок вдосконалення процесу сепарування та апаратурного обладнання.

Завдання досліджень.

- підвищити показники ефективності вилучення легких домішок із зернової суміші;
- розробити методику експериментального дослідження вібраційного сепарування зернової суміші, що містить легкі домішки;

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА ВІД ДОМІШОК

1.1. Класифікація зернових домішок та способи їх видалення

Домішки, що містяться в зерновій суміші, умовно можна класифікувати на: зернові, чужорідні (сорні), мінеральні та нерослинного (тваринного) походження. Класифікація домішок наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація домішок у зерні

Зернові домішки	Чужорідні (Сорні) домішки	Мінеральні домішки	Домішки нерослинного (тварини) походження
Бите зерно	Насіння інших рослин	Пісок	Комахи, жуки, кліщі
Щупле (чахле) зерно	Спориня	Камені	Фрагменти комах
Чужорідне зерно (інший вигляд зернових)	Зіпсовані зерна	Земля	Личинки, яйця комах
Зерно, яке проросло		Пил	Продукти секреції комах (тварин)
Зерно, пошкоджене шкідниками		Скло	
Зерно, пошкоджене внаслідок морозу		Метали	
Ости			
Зерна зі змінами кольори зародку			

За складністю вилучення із зернової суміші домішки можна розділити на дві групи. Перша - легковіддільні, ефективно видаляються з зернової суміші з урахуванням геометричних розмірів, ваги і аеродинамічних властивостей сміття (домішок). Ці домішки витягуються за допомогою вібросепараторів і трієрів [1].

Друга - важковіддільні, до них належать компоненти зернової суміші, розмірні характеристики та аеродинамічні властивості, яких близькі до характеристик насіння основної культури. Як правило, це насіння сорних і культурних рослин, мінеральні домішки. Для вилучення даних домішок використовують більш складні машини, наприклад пневмовібраційні сепаратори

[2].

Для пшениці важковіддільними домішками є насіння вівсюга, свербіги, ячменю та редьки дикої. Насіння даних рослин незначно відрізняється від зерна пшениці за розмірами та аеродинамічними властивостями, їх видалення можливо здійснити за сукупністю ознак, у тому числі, за масою (щільністю). За масою (щільністю) і розмірами важковіддільні домішки ділять на два типи: легкі і важкі. До першої групи відносять домішки, у яких маса (щільність) менше, ніж у основної маси сортової пшениці, до другої групи більш важкі [3-5].

Таблиця 1.2 - Вимоги до чистоти насіння пшениці

Категорія насіння	Чистота, %	Вміст насіння інших рослин,	
		шт/кг, не більше	
		Всього	Домішок
Оригінальні (ОС)	99	8	3
Елітні (ЕС)	99	10	5
Репродукційні (РС)	98	40	20
Репродукційні для виробництва товарної продукції (РСт)	97	200	70

Для продовольчої пшениці, з якої виробляють борошно, показник засміченості становить не більше 2%, що нижче, ніж для насінневої.

Таблиця 1.3 - Якісні показники пшениці

Якісні параметри	Сорт пшениці		
	Юка	Афіна	Ласка
Репродукція	2	1	1
Маса 1000 зерен/р	45,2	42,8	43,3
Натура зерна г/л	815	785	795
Вологість%	13,5	13,5	13,8
Вага партії, кг	3000	500	80
Засміченість партії,%	4	3	0,1

Застосовують ряд способів поділу зернового потоку за масою зерен.

Основними вважаються: поділ у рідині та псевдорозрідженому шарі.

Поділ в рідині - це витяг і сортування в рідині, здійснюється в розчинах різних речовин або ж в потоці води. Поділ у воді здійснюється у водоструйних сепараторах у горизонтальному та вертикальному потоках. Для зернових сумішей, густина яких перевищує густину води, використовуються сольові розчини. Даний спосіб очищення і калібрування насіння пшениці, у разі використання сольових розчинів веде до зниження біологічної активності насіння (енергії проростання і всхожості) навіть при нетривалому контакті з таким розчином. Для насінневого зерна зазвичай сольовий розчин замінюють суспензією води і крейди [6].

Даний спосіб вилучення важковіддільних домішок зазвичай застосовують на сільськогосподарських підприємствах для селекційних робіт перед посівом насіння.

Основними недоліками цього способу є його висока енергоємність, пов'язана з просушуванням насіння, низька продуктивність, висока вартість. Другий спосіб вилучення важковіддільних домішок із зернової суміші - поділ у псевдорозрідженому шарі [7]. Псевдорозрідження - це процес, в результаті якого, тверда статична зернова маса переводиться в псевдостан, подібний стану рідкої маси.

Для вилучення домішок застосовують такі способи псевдорозрідження зернового потоку:

- вібраційний,
- пневматичний,
- вібропневматичний,
- пневмоцентробіжний,

На рис 1.1 і 1.2 схематично показана сегрегація компонентів зернового потоку під впливом вібрації перфорованої робочої поверхні і потоку повітря [8].

Ефективне вилучення домішок із зернової суміші, що відрізняються за щільністю та розміром, у псевдорозрідженому шарі здійснюється комбінованим способом очищення. Як правило, для цього використовуються

вібропневмосепаратори. Ці пристрої дозволяють ефективно розшарувати зернову суміш і згрупувати в шари зерно з подібними фізичними параметрами. У подальшому зернову суміш поділяють одним із способів, показаних на рис. 1.2.

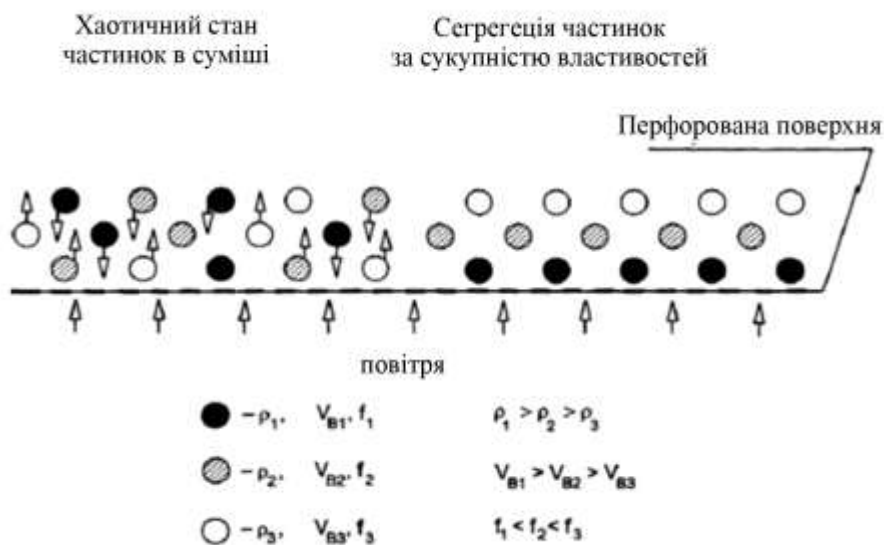


Рис. 1.1. Сегрегація компонентів зернової потоку під впливом вібрації перфорованої робочої поверхні і потоку повітря.

ρ, V, f - відповідно, густина, швидкість витягання і коефіцієнт тертя.

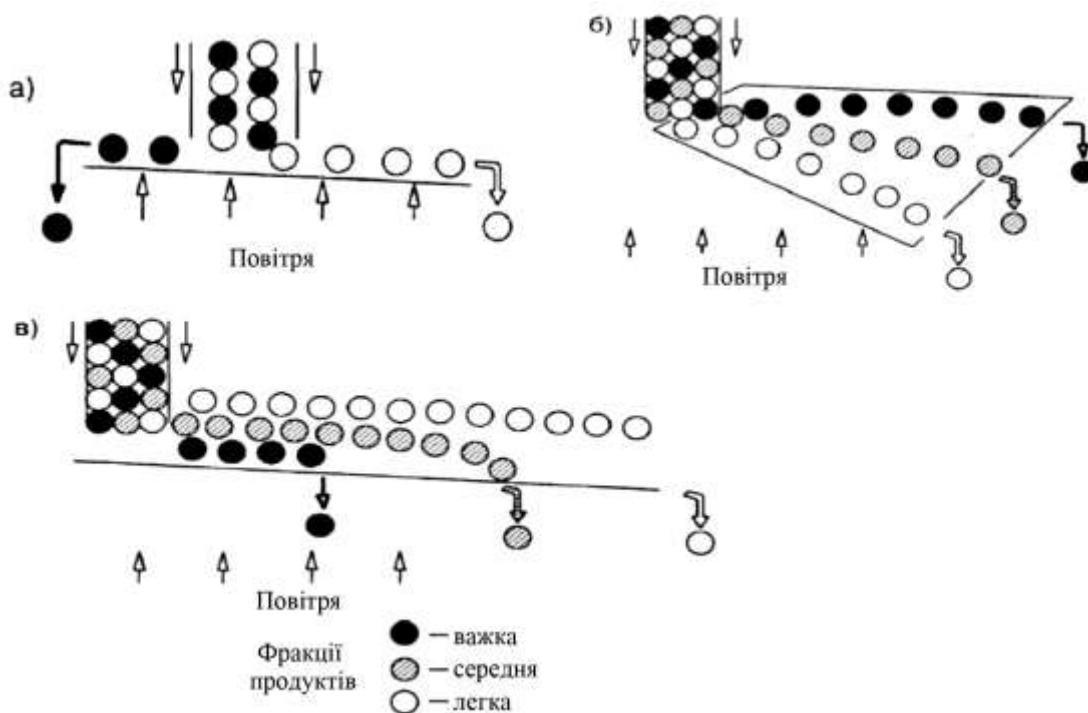


Рис. 1.2. Розділення компонентів зернової суміші за сукупністю ознак: а) протитічне, б) віялове, в) за зменшення густини.

Зі сказаного вище можна зробити висновок, що існує можливість підвищення ефективності очищення продовольчого і насінневого зерна за рахунок:

- вибору раціональних способів видалення важковіддільних домішок із зернової суміші, враховуючи форму і масу зерен,
- використання ефективних зерноочисних машин, проведення процесів за оптимальних параметрів.

1.2. Процеси та обладнання для очищення зерна від дрібних та легких домішок

Більшість обладнання, що використовується, на елеваторах і борошномельних заводах у технологічному процесі очищення зернової суміші від домішок і калібрування, створено з урахуванням багаторічних наукових досліджень у галузі вібраційного переміщення сипучих середовищ. Значний внесок у цьому напрямку науки зробили: І.І. Артоболевський, І.І. Блехман, Р.Ф. Ганієв, І.Ф. Гончаревич, В.Ф. Журавльов, В.Н. Потураєв, К.М. Рагульскіс, Н.В. Михайлов, Р.Ф. Нагаєв/

На сьогоднішній день зерноочисні машини і апарати, що використовують у своїй роботі принцип вібрації, займають домінуюче положення на підприємствах харчової промисловості та сільського господарства так як є відносно простими і в ряді випадків дозволяють інтенсифікувати процес видалення домішок шляхом об'єднання в єдиний комплекс окремих пристроїв, що застосовуються для процесу сепарування [9].

Розгляньмо детальніше процес вилучення домішок із зернової суміші та конструктивні особливості машин, що застосовуються для цього.

1.2.1 Ситові сепаратори для очищення зерна

Ситові сепаратори - найбільш поширений різновид зерноочисних машин, які застосовуються як у сільському господарстві так і харчовій промисловості.

Процеси, що протікають у ситових сепараторах, описані спеціальною літературою [10,11].

Процес, що лежить в основі роботи ситових сепараторів, умовно можна розділити на дві стадії: самосортування і просіювання. В результаті стадії самосортування важкі частинки суміші опускаються на поверхню сита в результаті відносного руху всієї зернової суміші по поверхні. На другому етапі прохідні частинки, розмір яких менший за отвори в ситі, продовжуючи відносний рух у нижньому шарі зернової суміші і проходячи над отвором сита, просіюються [12].

При невисокій концентрації прохідного матеріалу в зернової суміші на ефективність процесу ситового сепарування впливають безліч факторів. Наприклад, такі як: ймовірнісний характер властивостей елементарних частинок зернової суміші, множинність взаємодії їх між собою і робочою поверхнею сепаратора, кажуть, що для вивчення процесу ситового сепарування найбільш часто використовують детерміністський підхід, що дозволяє представити взаємодію частинок зернової суміші один з одним і ситовою поверхнею у вигляді нескладних математичних моделей, що враховують основні закони механіки: модель у вигляді матеріальної точки; модель у вигляді матеріальної частинки з наведеними параметрами; модель руху сипучого середовища по неоднорідній вібруючій поверхні; двомасова інерційна модель; модель плоских шарів; модель суцільного середовища; двошарова модель із сухим тертям [13].

Досягнення найбільших показників адекватності математичних моделей, що описують процеси, що протікають в ситовому сепараторі, можливо шляхом об'єднання в них двох підходів, описаних вище.

Конструктивні особливості та порядок роботи розглянемо на прикладі ситового вібросепаратора СПВ-Н. Даний пристрій застосовується для попереднього очищення зерна на сільськогосподарських підприємствах, комбикормових і круп'яних заводах, млинах та елеваторах. Конструктивна схема вібросепаратора СПВ-Н, представлена на рис. 1.3 [14].

Конструктивно вібросепаратор складається з: завантажувального

пристрою 1, набору сит 3, 4, 6, 7, розташованих в ситовому корпусі в два яруси, двох моторвібраторів 5, рами 12, яка поєднана з ситовим корпусом за допомогою пружин 8.

Процес сепарування протікає в такому порядку: зерноsumіш А, через завантажувальний пристрій 1 і систему похилих скатів 2 потрапляє на сортувальні сита 3 і 4, на яких відокремлюються великі домішки В, а зерно проходом надходить на підсвінні сита 6 і 7. Далі очищене зерно С, з сит 6 і 7 видаляється через лоток 10. Дрібні домішки D, які просіялися через сита 6 і 7 збираються на дні сепаратора і виводяться назовні.

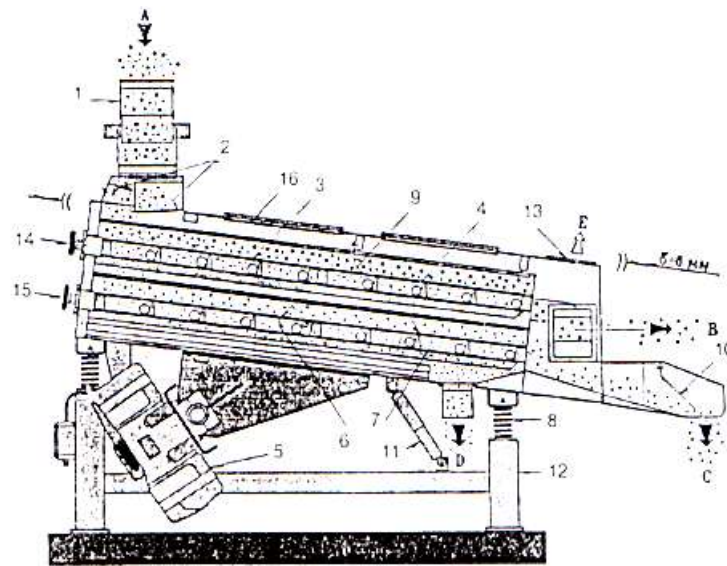


Рис. 1.3. Конструктивна схема ситового вібросепаратора СПВ-Н

Основними недоліками вібросепараторів є мала амплітуда коливання ситових поверхонь, що призводить до низької витягування легких домішок за один прохід і як наслідок, невисокої продуктивності.

1.2.2. Пневмосепаруючі пристрої

Процес повітряного (пнеumo) сепарування, заснований на відмінності аеродинамічних властивостей домішок і зернівок, вивчений і докладно описаний у працях багатьох вітчизняних і зарубіжних авторів [15].

У пневмосепаруючих пристроях використовують такі способи вилучення домішок за допомогою потоку повітря:

- сепарування в вертикальному повітряному потоці;
- сепарування в похилому повітряному потоці;
- повітряне сепарування з використанням кінетичної енергії компонентів зернової суміші;
- пневмоінерційне сепарування;
- пневмоситове сепарування.

До факторів, що робить істотний вплив на якість протікання процесу вилучення домішок, можна віднести:

- питому вагову навантаження;
- середню швидкість повітряного потоку;
- вирівняність повітряного потоку;
- фізико-механічні властивості компонентів сепарованої суміші і ступінь її засміченості;
- швидкість подачі і умови подачі зернової суміші в пневмоканал.

Через простоту конструктивних рішень і задовільних показників вилучення домішок дані пристрої отримали широке поширення на елеваторах і борошномельних підприємствах [16-17].

Пневмосепаратор складається з: вібропитача і замкнутої повітряної частини. Повітряна частина пристрою включає: приймальний бункер, пневмосепаруючий канал, осадову камеру з дроселюючою заслінкою у верхній її частині і шнеком в нижній, основний вентилятор, рециркуляційний канал. Конструкція пневмосепаратора приведена на рис. 1.4.

Технологічний процес очищення зерна в пневмосепараторі протікає наступним чином. Зернова суміш з приймального бункера 1 через живильний канал 2 надходить в пневмосепаруючий канал 3. У каналі 3 повітряним потоком із зернової суміші виділяють легкі (аеровідділені) домішки. Очищене від домішок зерно випадає і видаляється з пневмосепаратора через випускний патрубок 13. Висхідні повітряні потоки в каналі 3 створюються вентиляторами 9 і 10. Синхронна робота вентиляторів 9 і 10 забезпечує необхідний напір повітря (тиск) для подолання опору зернового шару при високих питомих навантаженнях.

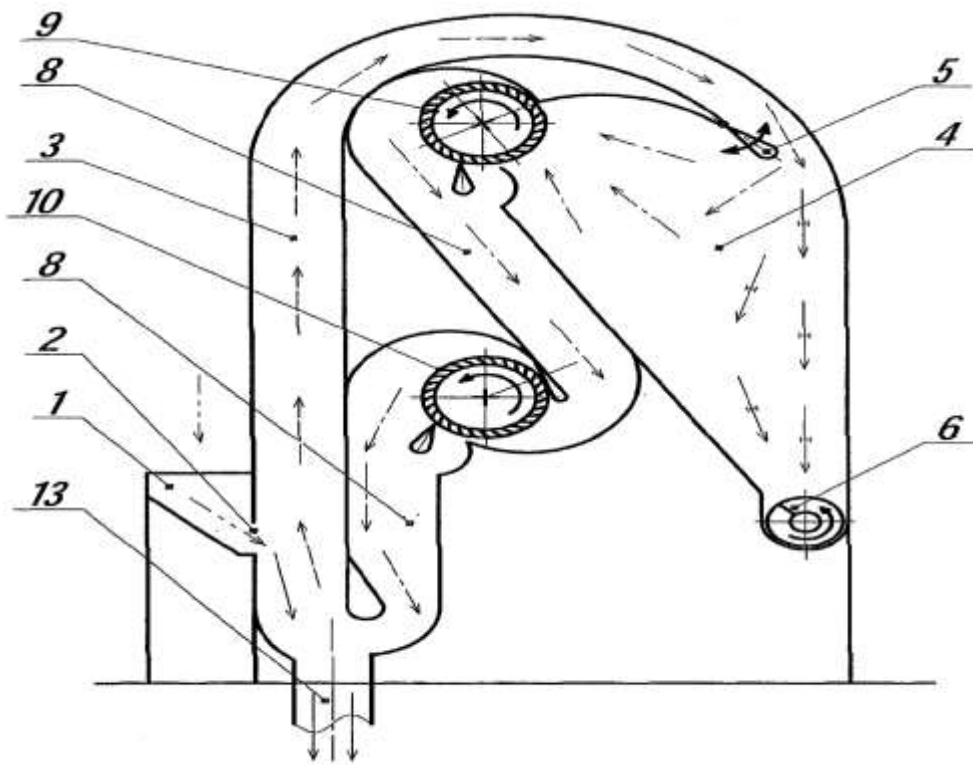


Рис. 1.4. Конструктивна схема пневмосепаратора

Приймальний бункер - 1, живильний отвір - 2, пневмоканал - 3, осадова камера - 4, дроселююча заслінка осадової камери - 5, шнек - 6, мотор-редуктора - 7, рециркуляційний канал - 8, основний вентилятор - 9, додатковий вентилятор - 10, електродвигуни - 11 і 12, випускний патрубок для очищеного зерна - 13, випускний патрубок - 14, герметизуючий пристрій - 15, керуючий модуль 16.

Витягнуті в пневмосепарирующем каналі 3 легкі домішки надходять в осадову камеру 4, де осаджуються і виводяться з неї за допомогою шнека 6. Легкі домішки витягуються через випускний патрубок. Герметизуючий пристрій 15 не допускає потрапляння повітря в пневмосепаратор. Дроселююча заслінка 5 дозволяє регулювати повітряні потоки на вході повітря в осадову камеру. Очищене від легких домішок повітря з камери 4 через канал 8 надходить в 3, закріплюючи цикл циркуляції повітря.

Недоліками пневмосепараторів є: невисока ефективність поділу зернового потоку на фракції; низький показник вилучення легких фракцій (домішок, сміття); необхідність частих технологічних регулювань для забезпечення необхідних якісних показників; висока енергоємність процесу сепарації; потреба

багаторазового повторення процесу сепарування [18].

Для підвищення якості процесу сепарування в пневмосепараторі багатьма авторами пропонується спосіб інтенсифікації самосортування у віброживильнику і подальшої подачі розшарованої зернової суміші в повітряну частину пристрою.

1.2.3. Вібропневмосепаратори

Процес вібропневматичного сепарування протікає в аерованому потоці зернової суміші на шорсткій робочій поверхні, що здійснює коливання.

Цей процес є складним через безліч зв'язків рухомих частинок зернової суміші, що взаємодіють один з одним, повітряним потоком і поверхнями, що обмежують зерновий потік.

Велика кількість наукових праць присвячена вивченню принципів роботи вібропневмосепараторів та шляхам підвищення якості процесу вилучення домішок із зернової суміші з їх допомогою [19-22].

Для детального вивчення процесу вібропневматичного сепарування має сенс представити його у спрощеному вигляді, розділивши на кілька етапів [43,76]. Далі з кожного етапу виділити явища, які мають суттєвий вплив на кінцевий результат всього процесу вилучення домішок.

Розглянемо більш детально роботи, присвячені процесу самосортування, як елементу процесу, що протікає на робочій поверхні вібропневмосепаратора і справляє істотний вплив на кінцевий результат.

Ряд вітчизняних і зарубіжних вчених займалися вивченням самосортування сипучих матеріалів, у тому числі і зернової суміші, при вібраційних впливах.

Однією з перших робіт у науковому середовищі, присвячених і експериментально обґрунтували сепарування, можна вважати публікацію Дейр, в якій він висунув гіпотезу про післярух сипучого тіла і встановив залежність розташування елементарної частинки залежно від її густини [23].

Висунута Дейром гіпотеза була підтверджена в результаті низки наукових

досліджень.

Узагальнюючи вищевикладені матеріали зазначимо, що вібропневмосепаратори класифікуються за наступними конструктивними ознаками:

- типу повітряної частини - з нагнітальної і вакуумної пневмосистемою;
- формі робочого органу (дека) - з трапецієподібною і прямокутною деком, що має форму тіла обертання.

На рис. 1.5 запропонована класифікація вібропневмосепараторів.



Рис. 1.5. Класифікація вібропневмосепараторів

Найбільше поширення в народному господарстві знайшли вібропневмосепаратори з трапецевидним робочим органом, друга їх назва - пневмосортувальні столи.

Процес сепарування в даному пристрої складається з двох взаємодоповнюючих фаз: самосортування (розшарування) зернової суміші в псевдорозрідженому шарі і роздільний рух компонентів зернової суміші до різних точок робочої поверхні [24].

Ділянку робочої поверхні (дека), на якій відбувається розшарування зернового потоку, називають зоною попереднього розшарування.

- зоною транспортування. Як правило, на зону попереднього

розшарування припадає близько 25% від загальної площі робочого органу.

Форма деки пневмосортувального столу залежить від тривалості руху легень і важких фракцій по ній. Застосовувані варіанти робочих органів представлені на рис. 1.6. Їх можна класифікувати на три групи: що забезпечує тривалу обробку важкої фракції зернової суміші (рис. 1.6 а, б, в), що забезпечує тривалу обробку легких фракцій (рис. 1.6 г) та забезпечує однаковий час обробки (рис. 1.6 д) [25].

Перша група, найбільш поширена, і використовується в пневмосортувальних столах фірм Forsberg (США), Sutton, Steele & Steele (США), Kamas (Швеція), Ogrim (Італія).

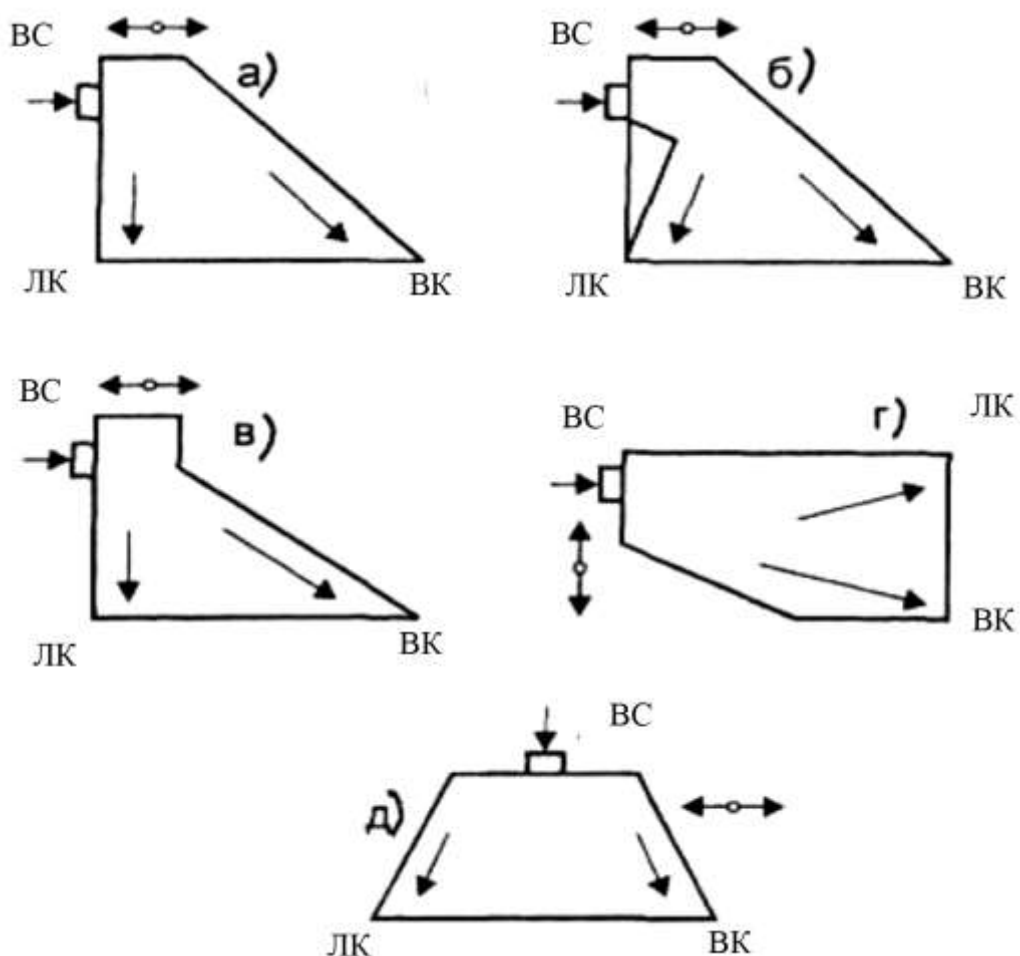


Рис. 1.6. Варіанти форм робочого органу пневмостолів:

BC – вихідна сировина (зернова суміш); ЛК - легкі компоненти зернової суміші; BK - важкі компоненти зернової суміші;

Друга використовується в пристроях фірм Oliver (США), Heid (Австрія). Ця форма дек найбільш перспективна і застосовується в машинах високої

продуктивності. Як правило, ці машини використовуються для очищення насіння зернових культур.

Третя група в основному використовується в столах, що випускаються фірмою Kamax.

Робочі органи пневмосортувальних столів можуть виконуватися з різних елементів залежно від їх функціонального призначення і необхідної продуктивності. Зазвичай це сита, пробивні решета і просівочно-витяжні решета з жалюзійними виступами. Випускаються дека у яких зони транспортування та попереднього розшарування виконані з різних елементів [26].

Для інтенсифікації процесу розшарування зернового потоку поверхня робочого органу може бути виконана з рифлями (рифлами). Це в свою чергу призводить до підвищення якісних показників але знижує продуктивність. Рифлі можуть бути розташовані перпендикулярно або паралельно лінії сходження зерна (рис. 1.7).

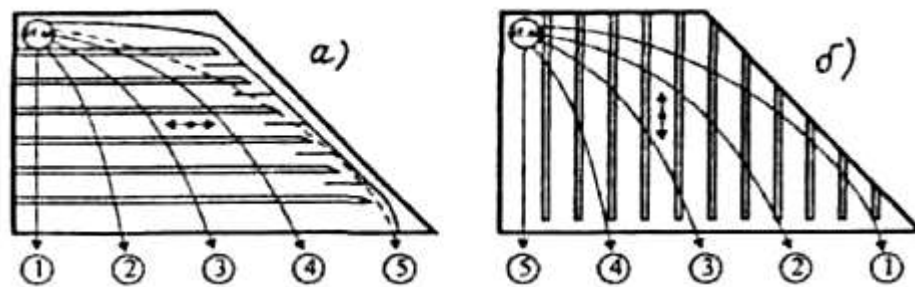


Рис. 1.7. Варіанти розташування рифлів на робочій поверхні

а) перпендикулярно, б) паралельно лінії сходження зерна

1 - легкі компоненти зернової суміші, 2 - 4 - товарне зерно; 5 - важкі компоненти зернової суміші.

Напрямок коливання робочої поверхні завжди перпендикулярний напрямку рифлів. Це пояснюється тим, що важкі фракції зернової суміші, опускаються на його поверхню і переміщуються між рифлями. Легкі домішки спливають над рифлями і рухаються під кутом, поперек рифлям.

Для фракційного поділу рушійного зернового потоку в закінченні робочої поверхні встановлюються ділники різних типів. На рис. 1.8 схематично

представлений вібропневмосепаратор з трьома типами ділителів: ножовим, решітним і шахтним.

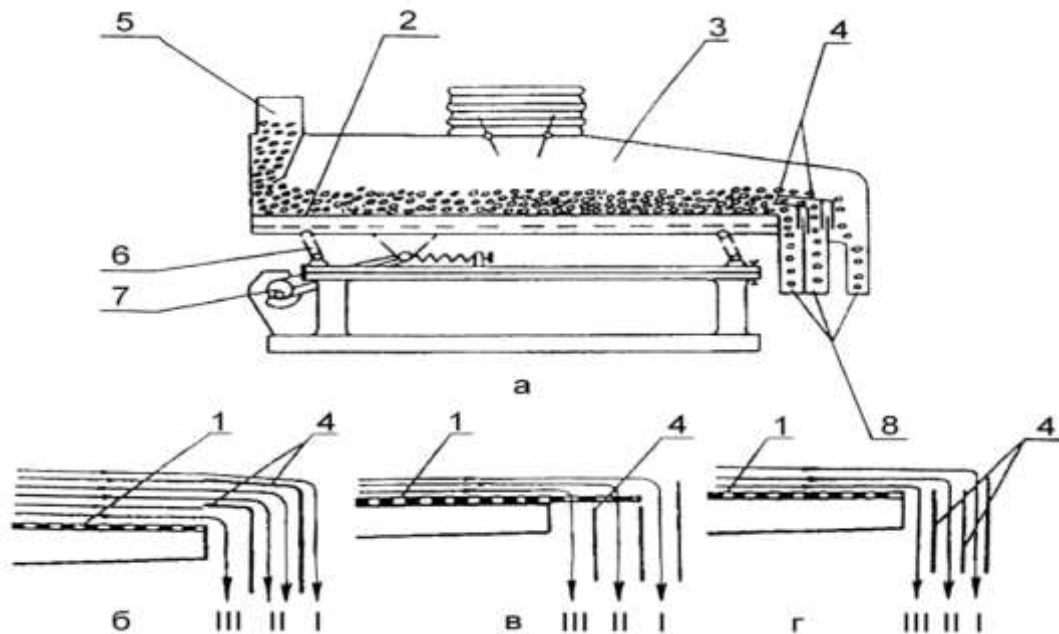


Рис. 1.8. Вібропневмосепаратор і варіанти ділителів зернового потоку:

а - вібропневмосепаратор; б - ножовий дільник; в - решітний; г - шахтний; 1- розвантажувальний кінець робочого органу; 2 - робочий орган; 3 - повітрязабірна камера; 4 - ділник псевдоожигеного шару; 5 - приймальний пристрій; 6 - рухома опора; 7 - привід; 8 - канали відведення продуктів поділу.

Перший тип ділителів застосовується при поділі рухомого зернового потоку на дві фракції. У разі встановлення додаткових ножів істотно погіршується якість процесу сепарації через порушення структури шарів у місці розташування ножових ділів [27].

Другий тип (решітний) ділителя забезпечує більш рівномірний поділ шарів зернової суміші. Рішучий ділник забезпечує поділ на фракції на 10 - 15% більше, ніж перший. Однак через зсув шарів під час руху за ґратами вони не мають високу якість сепарування.

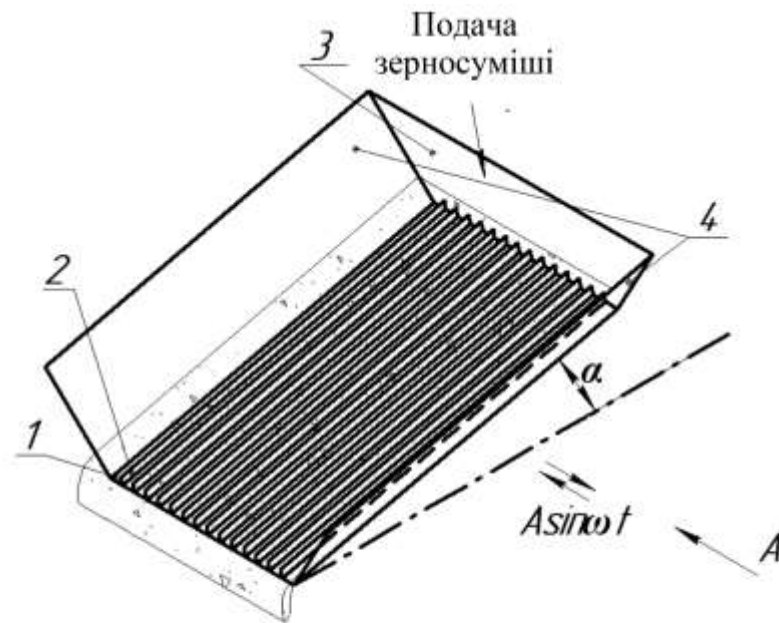
Третій тип (шахтний) вважається найбільш ефективним, з усіх застосовуваних типів ділів. Він забезпечує поділ зернової суміші на три фракції відповідно до заданих вимог.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЗЕРНОВОГО ПОТОКУ НА ВІБРУЮЧІЙ РИФЛЕНІЙ ПОВЕРХНІ

2.1. Дослідження робочого органу та опис процесу вібраційного переміщення зернової суміші

Плоска робоча поверхня 1 (рис. 2.1), нахилена горизонтально під кутом здійснює поступальні гармонійні коливання по прямій, що утворює з лінією найбільшого нахилу поверхні кут рівний 90° . На робочій поверхні на деякій відстані один від одного розташовані рифлі 2, які виконані у вигляді прямолінійних пластин. Рифлі встановлені паралельно один одному вздовж лінії найбільшого скату робочої поверхні. Зернова суміш рівномірно надходить на приймальну ділянку робочої поверхні, розташовану біля торцевої стінки 3. Під дією коливань утворює на робочій поверхні потік, що безперервно рухається від приймальної ділянки до протилежної ділянки поверхні. При достатній протяжності робочої поверхні на ній утворюється зерновий потік постійної товщини. При цьому товщина зернового потоку більше висоти рифлів [28].

Частинки зернової суміші, розташовані на різній відстані від робочої (опорної) поверхні мають відмінності в русі внаслідок різних умов зв'язку з навколишніми частинками та опорною поверхнею. Найменшою рухливістю володіють частинки нижнього шару зернового потоку, що заповнюють простір між рифлями опорної поверхні [29]. Більшою рухливістю володіють частинки верхнього шару потоку, розташованого над рифлями. При цьому, рухливість частинок верхнього шару зростає в міру наближення до вільної поверхні зернового потоку.



Вид А

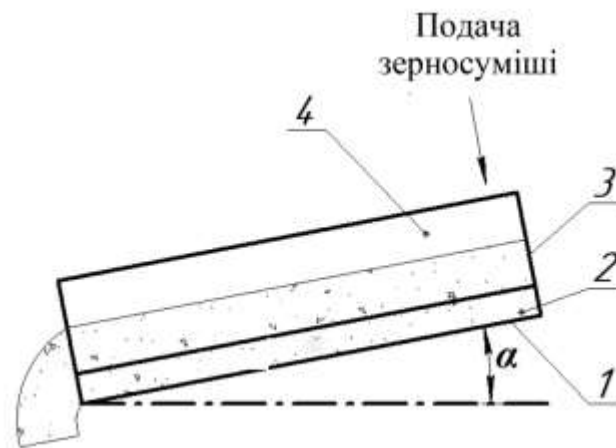


Рис. 2.1. Схема робочого органу і потоку сипучого тіла на віброуючій поверхні при безперервній подачі вихідної зерноsumісі.

Нижній шар зернового потоку робить коливання разом з робочою поверхнею. Верхній шар пов'язаний з нижнім тільки силами тертя, причому коефіцієнт опору зсуву шарів зменшується в міру наближення до верхньої (вільної) поверхні зернового потоку [30]. Це обумовлює інтенсивний післярух сипучого тіла і супутнє йому самосортування, яке полягає у спливанні у верхні шари частинок меншої густини і більшого розміру і в зануренні.

Підвищення ефективності процесу самосортування забезпечено відповідним розташуванням рифлів щодо спрямування коливань робочої

поверхні.

Розташування рифлів перпендикулярно напрямку коливань означає, що нижній шар зернового потоку нерухомий відносно поверхні в напрямку її коливань. Таким чином, на робочій поверхні створені умови для підвищення інтенсивності післяруху зернового потоку [31-33]. Інтенсивність сипучого тіла оцінюють ступенем відмінності швидкостей верхнього і нижнього шарів потоку. Швидкість нижнього шару в напрямку коливань дорівнює нулю.

Отже, на робочій поверхні створені умови, що забезпечують максимально можливу відмінність швидкостей верхнього і нижнього шарів зернового потоку. Оскільки ефективність процесу самосортування знаходиться в прямій залежності від інтенсивності шарового руху зернової суміші, то це означає, що на робочій поверхні створені найбільш сприятливі умови для протікання процесу самосортування.

При коливаннях робочого органу частинкам сипучого тіла від обмежуючих його поверхонь передаються силові імпульси, які повинні забезпечувати виконання наступних умов. По-перше, повинні забезпечувати транспортування зернової суміші вздовж робочої поверхні. По-друге, забезпечувати однакову на всій площі опорної поверхні інтенсивність самосортування зернової суміші. Виконання цих умов залежить від величини і напрямку силових імпульсів [34].

Візуальне спостереження процесів сепарування при різних видах коливального руху робочих органів дозволило зробити наступний висновок. Ефективне протікання процесу самосортування порушується в деякій області зернового потоку, що належить до стінок, що обмежують площу робочої поверхні. При цьому стінки встановлені перпендикулярно до площини поверхні [35].

При прямолінійних коливаннях робочого органу умови ефективного самосортування порушуються в областях зернового потоку, прилеглих до стінок, розташованих перпендикулярно напрямку коливань. У нашому випадку, такими стінками є бічні стінки 4 (рис. 2.1), які для зменшення негативного впливу на ефективність самосортування встановлені під кутом до площини робочої

поверхні, відмінним від 90^0 .

Верхній шар зернового потоку здійснює рух відносно поверхні під дією двох взаємно перпендикулярних сил: сили інерції переносного руху разом з опорною поверхнею та складовою сили тяжкості (скочувальної сили), спрямованої вздовж лінії найбільшого скату поверхні. При цьому, частинки верхнього шару здійснюють складний рух, який може бути представлений з рухів у двох взаємно перпендикулярних напрямках: «швидкий» коливальний рух відносно лінії найбільшого скату і «повільний» еволюційний рух уздовж лінії найбільшого [36]. Рух частинок нижнього шару між суміжними рифлями (пластинами) може бути наслідком спрямованого в середньому руху верхнього, розташованого над рифлями, шару зернової суміші вздовж лінії найбільшого скату.

2.2. Двошарова модель сипучого тіла

Для теоретичного опису вібраційного переміщення зернової суміші на пропонованій опорній поверхні розглянемо двошарову модель, в яку внесемо зміни, обумовлені наявністю на опорній поверхні рифлів у вигляді прямолінійних пластин. Будемо вважати верхній шар матеріальною точкою масою m_B , яка пов'язана силами сухого тертя з нижнім шаром, що здійснює коливання разом з робочим органом [36]. Отже, при дослідженні руху верхнього шару зернового потоку будемо розглядати рух матеріальної точки на похилій площині, що здійснює горизонтальні гармонійні коливання в напрямку перпендикулярного лінії найбільшого скату. При дослідженні руху нижнього шару розглянемо елемент об'єму між суміжними рифлями, вважаючи його матеріальною точкою, що рухається між суміжними рифлями без утворення зазорів і, отже, без ударів об бічні поверхні рифлів [38]. При цьому внаслідок коливань робочого органу матеріальна частинка має поперемінно силовий контакт з бічною поверхнею то однієї рифлі, то іншої. Отже, будемо розглядати рух матеріальної точки, яка пов'язана силами сухого тертя з бічною поверхнею

то однієї, то іншої рифлі, з вищележачим шаром і з опорною поверхнею, що здійснює горизонтальні гармонійні коливання перпендикулярно лінії найбільшого скату [39].

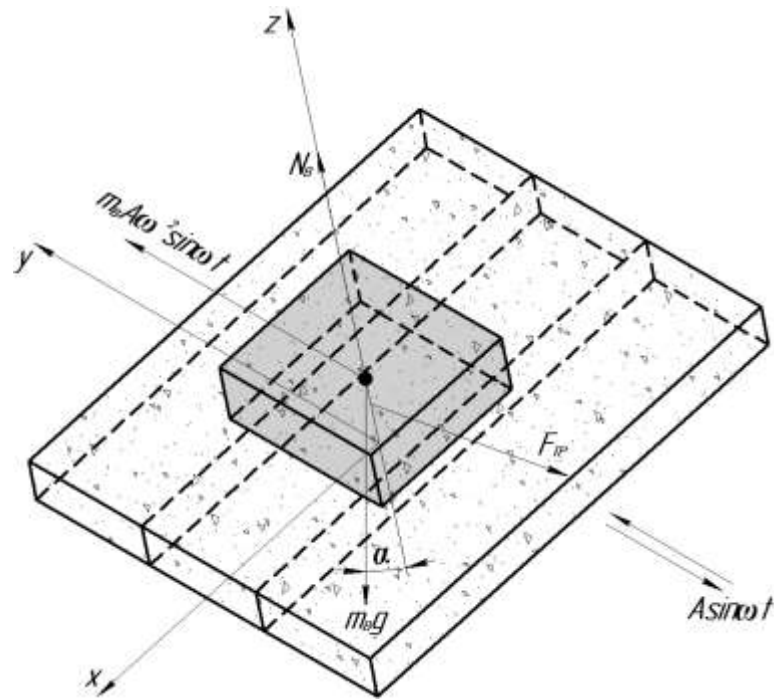


Рис. 2.2. Двошарова модель сипучого тіла

2.2.1. Рух верхнього шару

Рух матеріальної частинки розглянемо як суму переносного разом з робочою поверхнею та відносного відносно поверхні у системі координат x, y, z , яка жорстко пов'язана з робочим органом. Осі системи координат розташовані наступним чином: вісь x спрямована вздовж рифлів (пластин); вісь y - перпендикулярно пластинам (перпендикулярно лінії найбільшого скату поверхні); вісь z - перпендикулярно площині робочої поверхні (рис. 2.3) [40].

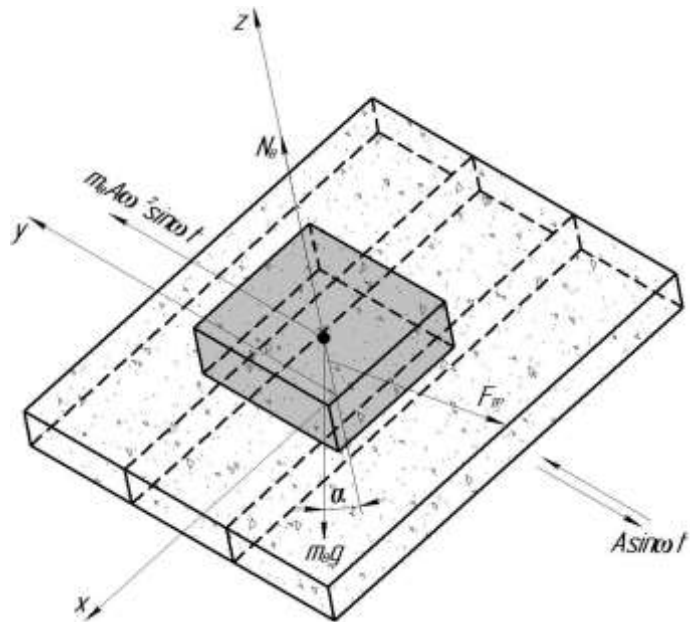


Рис. 2.3. Схема сил, що діють на частинку у відносному русі

Робоча поверхня здійснює горизонтальні гармонійні коливання за законом

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

де A і ω - амплітуда і частота коливань робочої поверхні.

На рис. 2.3 представлена схема прийнятої моделі – матеріальної частинки масою m_B і показані такі діючі на неї сили:

$P_B = m_B A \omega^2 \sin \omega t$ - сила інерції переносного руху;

$m_B g$ - сила тяжіння частинки;

N_B - нормальна реакція нижнього шару;

F_{TP} - сила тертя про нижній шар, що робить коливання разом з робочою поверхнею.

Сила тертя F_{TP} спрямована проти відносної швидкості V_{B-H} - верхнього шару відносно нижнього. Як показано на рис. 2.4, на якому зображена проекція прийнятої моделі на площину робочої поверхні, сила тертя F_{TP} утворює з віссю y кут ν .

На матеріальну частинку в площині паралельній площині робочої поверхні діють дві взаємно перпендикулярні сили, які можуть викликати рух

частинки відносно поверхні [41]. Перша сила - сила інерції переносного руху, рівна $m_B A \omega \sin \omega t$ виробу маси частинки на прискорення точок робочої поверхні. Друга сила - скочувальна сила, рівна $m_B g \sin \alpha$ проекції сили тяжіння частинки на лінію найбільшого скату. Таким чином, матеріальна частинка, що знаходиться на похилій площині, що здійснює горизонтальні гармонійні коливання перпендикулярно лінії найбільшого скочування, може здійснювати рух відносно поверхні в тому випадку, якщо сума переносної сили інерції і скочувальної сили більше сили тертя F_{TP} . Умова руху матеріальної частинки відносно робочої поверхні має вигляд:

$$\sqrt{(m_B A \omega^2 \sin \alpha)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2} \geq F_{TP}. \quad (2.2)$$

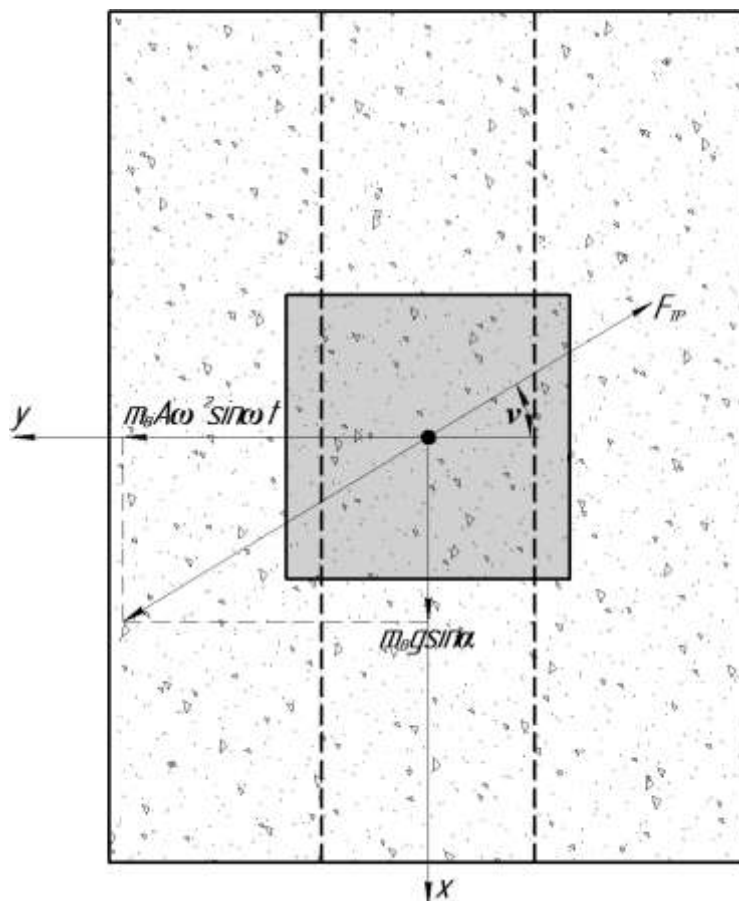


Рис. 2.4. До визначення напрямку сили тертя F_{TP}

Знак рівності в нерівності (2.2) відповідає умові початку відносного руху частинки.

Слід зауважити, що матеріальна частинка може здійснювати рух відносно поверхні в напрямку, що збігається з напрямком рівнодіючої сили, яка є сумою переносної сили інерції і скочувальної сили [42-45].

Диференціальні рівняння відносного руху частинки в проекціях на осі координат для випадку ковзання частинки в позитивному напрямку осі y мають вигляд:

$$m_B \ddot{x} = m_B g \sin \alpha - F_{TP} \sin \nu; \quad (2.3)$$

$$m_B \ddot{y} = m_B A \omega^2 \sin \omega t - F_{TP} \cos \nu \operatorname{sign} \dot{y}; \quad (2.4)$$

$$m_B \ddot{z} = -m_B g \cos \alpha + N_B. \quad (2.5)$$

В даному випадку рух частинки вздовж осі x можливий тільки в позитивному напрямку. Знак проекції сили тертя F_{TP} на вісь x не залежить від напрямку ковзання частинки уздовж осі y . При ковзанні частки уздовж осі y має місце симетрія рушійних сил і сил опору відносному руху частинки [46].

Так як рух частинки відбувається без підкидання, то $z = \text{const}$, $z = 0$, з рівняння (2.5) отримаємо вираз сили нормального тиску

$$N_B = m_B g \cos \alpha. \quad (2.6)$$

$$F_{TP} = N_B f_c = m_B g f_c \cos \alpha, \quad (2.7)$$

де f_c - коефіцієнт опору зсуву верхнього шару відносно нижнього.

Зведемо обидві частини нерівності (2.2) в квадрат і підставимо в нього вираз сили тертя F_{TP} з рівняння (2.7), отримаємо:

$$(m_B A \omega^2 \sin \omega t)^2 + (m_B g \sin \alpha)^2 \geq (m_B g f_c \cos \alpha)^2. \quad (2.8)$$

Перша складова лівої частини нерівності (2.8) є змінною величиною, що залежить від часу. Максимальне значення за абсолютною величиною це додане, яке являє собою силу інерції переносного руху, приймає при $\sin \omega t = 1$. Отже, кут ν , який утворюється силою тертя F_{TP} з віссю y , є змінною величиною, залежної від величини сили інерції переносного руху. Максимальне значення кута ν приймається в мить початку відносного руху частинки, тобто при мінімальному значенні сили інерції, при якому виконується умова початку відносного руху. З нерівності (2.8) випливає, що умова початку відносного руху частинки може бути представлена у вигляді:

$$(m_B A \omega^2 \sin \delta)_{\min} = \sqrt{(m_B g f_c \cos \alpha)^2 - (m_B g \sin \alpha)^2}, \quad (2.9)$$

$$\sin \delta_{\min} = \frac{g}{A \omega^2} \sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (2.10)$$

Тоді мінімальне значення сили P_B інерції переносного руху, при якому частинка може починати відносний рух має вигляд:

$$(P_B)_{\min} = m_B g \sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}. \quad (2.11)$$

Максимальне значення кута ν може бути визначено за формулою:

$$\nu_{\max} = \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha}{\sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (2.12)$$

Максимальне значення кута ν може бути також визначено за формулами:

$$\nu_{\max} = \arccos \frac{\sqrt{(f_c \cos \alpha)^2 - \sin^2 \alpha}}{f_c \cos \alpha} \quad (2.13)$$

$$\nu_{\max} = \arcsin \frac{\sin \alpha}{f_c \cos \alpha}. \quad (2.14)$$

Мінімальне значення кут ν приймає при максимальному значенні сили інерції $m_B A \omega^2 \sin \omega t$ переносного руху. Як зазначено вище, сила інерції приймає максимальне значення при $\sin \omega t = 1$, що рівна $m_B A \omega^2$.

Мінімальне значення кута ν визначасмо за формулою:

$$\nu_{\min} = \operatorname{arctg} \frac{g \sin \alpha}{A \omega^2}. \quad (2.15)$$

Аналіз формул для визначення максимального і мінімального значень кута ν дозволив зробити наступні висновки [47]. Максимальне значення кута ν не залежить від кінематичних параметрів (амплітуда і частота) коливань робочої поверхні, а залежить від кута α нахилу поверхні до горизонталі і від коефіцієнта f_c тертя ковзання верхнього шару щодо нижнього. Мінімальне значення кута ν залежить від амплітуди і частоти (кінематичних параметрів) коливань робочої поверхні і від кута α нахилу до горизонталі.

Експериментальні дослідження (див. розділ 3) руху частинки відносно похилої поверхні, що здійснює горизонтальні гармонійні коливання перпендикулярно лінії найбільшого скату, дозволяють зробити висновок про те, що кут буде змінено в досить вузькому діапазоні його значень. Тому вважатимемо кут ν постійним і приймемо його значення як середнє максимального і мінімального значень;

$$\nu = \frac{\nu_{\max} + \nu_{\min}}{2}. \quad (2.16)$$

Підставами з рівняння (2.7) вираз сили тертя F_{TP} в рівняння (2.3) і (2.4), після поділу на m_B і перетворень отримуємо:

$$\ddot{x} = g \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \quad (2.17)$$

$$\ddot{y} = A\omega^2 \cdot \left(\sin \delta \mp \frac{gf_c \cos \alpha \cos \nu}{A\omega^2} \right). \quad (2.18)$$

У рівнянні (2.18) верхній знак у виразі, що стоїть в круглих дужках, відповідає ковзанню частки в позитивному напрямку осі y , нижній знак - в негативному.

$$Z_{\pm} = \pm \frac{gf_c \cos \alpha \cos \nu}{A\omega^2}. \quad (2.19)$$

Тоді рівняння (2.18) приводимо до відомого виду:

$$\ddot{y} = A\omega^2 \cdot (\sin \delta - Z_{\pm}). \quad (2.20)$$

У рівняннях (2.19) і (2.20) верхні індекси і знаки відносяться до випадку ковзання частинки в позитивному напрямку осі y ($y > 0$), а нижні індекси і знаки для зворотнього випадку.

Позначимо фазові кути δ , при яких починається відносне ковзання частинки в позитивному і негативному напрямках осі y , відповідно δ_{+1} , δ_{-1} .

Ковзання частинки в позитивному напрямку осі y може початися, якщо $y \geq 0$, тобто при $\sin \delta_{+1} \geq Z_{+}$, де Z_{+} - безрозмірний параметр опору відносному руху частинки в позитивному напрямку осі y [48]. Ковзання частинки в негативному напрямку може початися, якщо $y \leq 0$, тобто при $\sin \delta_{-1} \geq Z_{-}$, де Z_{-} - безрозмірний

параметр опору відносному руху частинки в негативному напрямку осі y .

Як видно з формули (2.19) в розглянутому випадку вібраційного переміщення має місце рівність $Z_+ = Z_-$. Це є наслідком того що, як зазначено вище, при ковзанні частинки вздовж осі y має місце симетрія рушійних сил і сил опору відносному ковзанню [49].

Як встановлено в роботах, за таких умов вібраційного переміщення частинка може рухатися відносно поверхні, що коливається, у двох режимах. Відповідно до прийнятої в цих роботах термінології це режим 1 і режим 2. Режим 1 - двостороннє ковзання частинки з двома паузами. Режим 2 - двостороннє ковзання частинки без пауз (з двома миттєвими зупинками).

У сепаруючих машинах із перерахованих вище режимів доцільно забезпечувати рух частинок зернової суміші в режимі 2. Цей режим забезпечує найбільш раціональне використання часу перебування сепарованої зерносуміші на робочій поверхні, оскільки процес самосортування відбувається найбільш ефективно при відносному русі шарів зернової суміші [50-51].

Нагадаємо, що відповідно до прийнятих позначень частинка починає рух у позитивному напрямку осі y при фазовому куті δ_{+1} .

Для визначення залежності швидкості частинки при її ковзанні в додатному напрямку осі y проінтегруємо рівняння (2.20) в межах від $y \geq 0$ до поточного значення швидкості $y \leq 0$. При інтегруванні маємо на увазі, що

$$dt = \frac{d\delta}{\omega} \text{ и } \dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{\omega y \dot{\delta}}{d\delta}.$$

$$\dot{y}(\delta) = A\omega \cdot [(\cos \delta_{+1} - \cos \delta) - Z_+ \cdot (\delta - \delta_{+1})]. \quad (2.21)$$

Права частина рівняння (2.21) прирівнюється до нуля в мить припинення ковзання частинки в позитивному напрямку осі y , то:

$$\dot{y}(\delta) = A\omega \cdot [(\cos \delta_{+1} - \cos \delta) - Z_+ \cdot (\delta - \delta_{+1})]. \quad (2.22)$$

Для визначення залежності швидкості частинки при її ковзанні в негативному напрямку осі y проінтегруємо рівняння (2.20) в межах від $y = 0$ до $y \leq 0$.

$$j(\delta) = A\omega \cdot [(\cos \delta_{1-} - \cos \delta) - Z_- \cdot (\delta - \delta_{1-})]. \quad (2.23)$$

$$\cos \delta_{1-} - \cos \delta_{2-} = Z_- \cdot (\delta_{2-} - \delta_{1-}). \quad (2.24)$$

При русі частинки в режимі двостороннього ковзання без пауз (з миттєвими зупинками), початок руху частинки в кожному з напрямків збігається за часом фазовому куту із закінченням руху в протилежному напрямку, тобто має виконуватися умова:

$$\begin{cases} \delta_{1-} = \delta_{2+} \\ \delta_{2-} = \delta_{1+} + 2\pi \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = Z_- \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+} - 2\pi). \quad (2.26)$$

Зауважте, що ліва частина рівняння (2.22) дорівнює лівій частині рівняння (2.26). Прирівняємо праві частини цих рівнянь і після елементарних перетворень отримуємо:

$$Z_+ \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}) = Z_- \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}) - 2\pi Z_-. \quad (2.27)$$

$$\delta_{2+} - \delta_{1+} = \pi. \quad (2.28)$$

$$\delta_{2-} - \delta_{1-} = \pi. \quad (2.29)$$

Отже, при встановленому русі частинки в режимі 2 (ковзання без пауз - з миттєвими зупинками) при виконанні умови $Z_+ = Z_-$ фазові кути початку і закінчення ковзання в кожному з напрямків відрізняються один від одного на π .

Висловимо значення фазового кута із рівняння (2.28)

$$\delta_{2+} = \pi + \delta_{1+}. \quad (2.30)$$

Після підстановок з рівнянь (2.28) і (2.30) в рівняння (2.22) і перетворень, отримаємо:

$$2 \cos \delta_{1+} - \pi Z_+ = 0. \quad (2.31)$$

Для визначення $(Z_+)_{2\max}$ максимального значення безрозмірного параметра Z_+ при якому частка робить рух щодо робочої поверхні в режимі 2, вирішимо рівняння (2.31) щодо Z_+ маючи на увазі, що

$$\cos \delta_{1+} = \sqrt{1 - \sin^2 \delta_{1+}} \quad \text{и} \quad \sin \delta_{1+} = (Z_+)_{2\max} ;$$

$$(Z_+)_{2\max} = \frac{2}{\sqrt{4 + \pi^2}} . \quad (2.32)$$

З останнього рівняння отримуємо максимальне значення Z_+ параметра при якому частка рухається щодо опорної поверхні в режимі 2, тобто в режимі двостороннього ковзання без пауз (з двома миттєвими зупинками) [51]. Це значення параметра Z_+ рівне $(Z_+)_{2\max} = 0,537$. Нагадаємо, що в даному випадку безрозмірні параметри Z_+ і Z_- дорівнюють один одному по абсолютній величині, відрізняються тільки знаком, тобто $Z_- = -Z_+$. Очевидно, що в цьому випадку мінімальне значення безрозмірного параметра Z_- опору відносного руху частинки в негативному напрямку осі y , при якому частка може здійснювати рух в режимі 2 має дорівнювати $(Z_-)_{2\min} = -0,537$. Доведемо це твердження.

З рівняння (2.29) випливає, що:

$$\delta_{2-} = \pi + \delta_{1-} . \quad (2.33)$$

Зробимо підстановки з рівнянь (2.29) і (2.33) на рівняння (2.24).

Після перетворень отримаємо:

$$2 \cos \delta_{1-} = \pi Z_- . \quad (2.34)$$

Як зазначено вище, при збільшенні абсолютного значення параметра Z_- рух частинки з режиму 2 може перейти в рух в режимі 1. На кордоні існування режиму 2 у встановленому русі фазовий кут δ_{1-} початку руху частинки у зворотньому напрямку осі y може бути визначений [52]:

$$\delta_{1-} = \pi + \arcsin |Z_-| . \quad (2.35)$$

Підставимо значення фазового кута δ_{1-} з рівняння (2.35) в рівняння (2.34).

Після перетворень лівої частини отриманого рівняння маємо

$$-2\sqrt{1 - Z_-^2} = \pi Z_- . \quad (2.36)$$

Вирішуючи останнє рівняння щодо Z_- маємо:

$$(Z_-)_{2\min} = -\frac{2}{\sqrt{4 + \pi^2}} . \quad (2.37)$$

Отже, режим відносного руху частинки за один період коливань робочої

поверхні може бути визначений наступним чином: при $Z_+ = Z \leq 0,537$ - двостороннє ковзання без пауз (з двома миттєвими зупинками); при $Z_+ = Z \geq 0,537$ - двостороннє ковзання з двома паузами [53].

Відомо, що при вирішенні завдань вібраційного переміщення матеріальної частинки у всіх режимах крім режиму 2 (з двома миттєвими зупинками) отримати аналітичні вирази для визначення фазових кутів початку і закінчення ковзання в позитивному і негативному напрямках не представляється можливим.

Нехай частинка рухається відносно коливається робочої поверхні в режимі 2. Отримаємо аналітичні вирази для визначення фазових кутів δ_{1+} і δ_{2+} .

Розглянемо два варіанти вирішення поставленого завдання.

Перший варіант вирішення завдання заснований на методиці запропонованої та обґрунтованою В.В. Гортинським.

Розгляньмо рівняння (2.22). Використовуючи відому формулу тригонометричних перетворень, уявімо:

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = 2 \sin \frac{\delta_{2+} - \delta_{1+}}{2} \sin \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2}. \quad (2.38)$$

Підставивши різницю фазових кутів з рівняння (2.28) в останнє рівняння, отримаємо:

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = 2 \sin \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2}. \quad (2.39)$$

Підставимо рівняння (2.39) рівнянням (2.22) з огляду на рівняння (2.28), маємо:

$$2 \sin \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} = \pi Z_+. \quad (2.40)$$

З останнього рівняння випливає, що:

$$\frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} = \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.41)$$

$$\frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} = \pi - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.42)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.42) та (2.28), отримуємо:

$$\delta_{1+} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}; \quad (2.43)$$

$$\delta_{2+} = \frac{3\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.44)$$

Формули (2.43) і (2.44) дозволяють визначити фазові кути δ_{1+} і δ_{2+} відповідно початку і закінчення відносного ковзання частинки в позитивному напрямку осі y [54]. Фазові кути δ_{1-} і δ_{2-} початку і закінчення ковзання в негативному напрямку визначаємо з рівнянь системи (2.25). З другого рівняння системи (2.25) отримуємо:

$$\delta_{2-} = \frac{5\pi}{2} - \arcsin \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.45)$$

Розгляньмо другий варіант виводу аналітичних виразів для визначення фазових кутів δ_{1+} і δ_{2+} .

Підставивши рівняння (2.22) вираз фазового кута δ_{2+} з рівняння (2.30) і вираження різниці фазових кутів δ_{1+} і δ_{2+} рівняння (2.28), отримуємо:

$$2 \cos \delta_{1+} = \pi Z_+. \quad (2.46)$$

$$\delta_{1+} = \arccos \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.47)$$

$$\delta_{2+} = \pi + \arccos \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.48)$$

$$\delta_{2-} = 2\pi + \arccos \frac{\pi Z_+}{2}. \quad (2.49)$$

Використання двох різних методик вирішення завдання виведення формул для обчислення значень фазових кутів δ_{1+} і δ_{2+} , δ_{1-} та δ_{2-} початку і закінчення руху частинки в позитивному і негативному напрямках дозволило зробити наступний висновок [55]. Фазові кути можна знайти за формулами (2.47), (2.48) і (2.49). Формули (2.43), (2.44) та (2.45), отримані за методикою запропонованою та обґрунтованою В.В. Гортинським, та формули (2.47), (2.48) і (2.49), отримані запропонованою в методиці мають різний вигляд. Формули відрізняються кількістю операцій обчислення [56]. Слід зауважити, що у запропонованих до

використання формулах під знаком функцій арксинус арккосинус стоїть один і той же аргумент, рівний $\pi Z_+/2$. Тобто кількість операцій обчислення для визначення аргументу вказаних функцій у всіх формулах однакове. Значення фазового кута δ_{1+} може бути визначено або за формулою (2.43), або за формулою (2.47). При цьому, при визначенні значення фазового кута δ_{1+} за формулою (2.43) необхідно спочатку виконати операцію обчислення функції $\arcsin \pi Z_+/2$, а потім отриманий результат відняти з величини, рівної половині числа π . Під час використання формули (2.47) значення кута δ_{1+} визначається обчисленням функції $\arccos \pi Z_+/2$. Аналогічні міркування показують, що формули, запропоновані в цій роботі містять меншу кількість операцій обчислення при визначенні однойменних значень фазових кутів. Використання формул з меншою кількістю обчислювальних операцій знижує трудомісткість розрахунків, зменшує ймовірність здійснення помилок при виконанні розрахунків і спрощує розробку програмного забезпечення розрахунків при використанні обчислювальної техніки [57].

Встановлено, що в розглядуваному випадку вібраційного переміщення, при русі частинки відносно робочої поверхні в режимі 2, фазові кути початку і закінчення ковзання в одному напрямку відрізняються один від одного на величину π . Це означає, що половину періоду коливань поверхні частинка рухається в позитивному напрямку осі y і половину періоду в негативному. Такий характер відносного руху частинки є наслідком симетрії рушійних сил і сил опору [58].

Зауважимо, що отримані вище формули для визначення фазових кутів початку і закінчення ковзання частинки в позитивному і негативному напрямках осі y справедливі тільки для випадку ковзання частинки в режимі 2.

$$\delta_{1+} = \arcsin Z_+ \quad (2.50)$$

$$\delta_{1-} = \pi + \arcsin |Z_-| \quad (2.51)$$

$$\delta_{1-} = \pi + \arcsin Z_+ = \pi + \delta_{1+} \quad (2.52)$$

Таким чином, у розглянутому випадку значення фазового кута δ_{1+}

відрізняється від значення кута δ_{1-} на величину π .

Фазові кути закінчення руху частинки у позитивному та негативному напрямках осі y визначають, вирішуючи методом послідовних наближень відповідно рівняння (2.22) щодо δ_{2+} та рівняння (2.24) відносно δ_{1-} . Відзначимо, що в нашому випадку фазовий кут δ_{1+} відрізняється від кута δ_{1-} на величину π , тобто:

$$\delta_{2-} = \delta_{2+} + \pi. \quad (2.53)$$

З наведених вище міркувань можна зробити наступний висновок.

У разі симетрії рушійних сил і сил опору при русі частинки відносно поверхні в режимі 1 може бути запропоновано три варіанти вирішення завдання по визначенню значень фазових кутів початку і закінчення руху частинки в позитивному і негативному напрямках осі y [59]. Варіант перший: фазові кути δ_{1+} і δ_{2+} , δ_{1-} та δ_{2-} початку і закінчення ковзання частинки в позитивному і негативному напрямках можуть бути визначені відповідно з рівнянь (2.50), (2.22), (2.51) і (2.24). Другий варіант: визначаємо значення фазових кутів δ_{1+} і δ_{2+} початку і закінчення ковзання частинки в позитивному напрямку відповідно з рівнянь (2.50) і (2.22), а потім, додавши до кожного з них π , отримуємо значення фазових кутів δ_{1-} та δ_{2-} початку і закінчення ковзання частинки в від'ємному напрямку. Варіант третій: визначаємо значення фазових кутів δ_{1-} та δ_{2-} відповідно з рівнянь (2.51) і (2.24); значення кутів δ_{1+} і δ_{2+} отримуємо простим відніманням π відповідно з значень кутів δ_{1-} та δ_{2-} .

Відзначимо деякі особливості розглянутого завдання вібраційного переміщення матеріальної частинки. Рух частинки відносно робочої поверхні відбувається в результаті спільної дії двох взаємно перпендикулярних сил: сили інерції переносного руху і скочувальної сили [60]. При цьому частинка здійснює рух відносно поверхні в тому випадку, якщо сума зазначених сил перевищує силу тертя, тобто при виконанні нерівності (2.2). Напрямок руху частинки збігається з напрямком сили, що є геометричною сумою переносної сили інерції і скочувальної сили. Таким чином, частинка здійснює рух відносно поверхні в напрямку, що утворює кут. Отже, початок і закінчення руху частинки відносно

поверхні вздовж осей x і y збігаються за часом і фазовим кутом. Як встановлено вище, частинка може здійснювати рух уздовж осі y як у позитивному, так і в негативному напрямках. При цьому частинка може здійснювати рух уздовж осі y в двох режимах. Або в режимі двостороннього ковзання без пауз (з двома миттєвими зупинками), або в режимі двостороннього ковзання з двома паузами [61]. Вздовж осі x частинка може здійснювати рух тільки в позитивному напрямку. Існування такого руху вздовж осі x може бути доведено наступним чином: Як видно з рівняння (2.3) вздовж осі x на частинку діють дві сили: скочувальна сила $m_B g \sin \alpha$ - проекція сили тяжіння на вісь; сила $F_{TP} \sin \nu$ - це проекція сили тертя на вісь. З двох сил, що діють на частинку вздовж осі x , роль рушійної сили може виконувати лише скочувальну силу $m_B g \sin \alpha$. Оскільки напрямок руху частинки збігається з напрямком рушійної сили, то це означає, що частинка може здійснювати рух тільки в позитивному [62].

Таким чином, в напрямку осі x частинка може здійснювати рух у двох режимах: або в режимі одностороннього ковзання без пауз (з двома миттєвими зупинками), або в режимі одностороннього ковзання з двома паузами. Слід зауважити, що якісні характеристики режимів відносного руху частинки представлені, як це прийнято в основоположних роботах з теорії вібраційного переміщення, за один період коливань робочої поверхні.

Представимо ще один доказ того, що рух частинки вздовж осей x і y починається одночасно.

З рівняння (2.3) випливає, що частинка ковзає в позитивному напрямки осі x , якщо виконується нерівність:

$$m_B g \sin \alpha > F_{TP} \sin \nu . \quad (2.54)$$

Після підстановки виразу сили тертя F_{TP} з рівняння (2.7) нерівність (2.54) і перетворень отримаємо:

$$\sin \alpha > f_c \cos \alpha \sin \nu . \quad (2.55)$$

Зауважимо, що нерівність (2.55), що є умовою відносного руху частинки вздовж осі x , може бути отримано також з рівняння (2.17).

Отримаєм:

$$y_+(\delta) = A \cdot \left[(\cos \delta_{1+} + Z_+ \delta_{1+}) \cdot (\delta - \delta_{1+}) - (\sin \delta - \sin \delta_{1+}) - Z_+ \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (2.56)$$

$$y_-(\delta) = A \cdot \left[(\cos \delta_{1-} + Z_- \delta_{1-}) \cdot (\delta - \delta_{1-}) - (\sin \delta - \sin \delta_{1-}) - Z_- \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1-}^2}{2} \right]. \quad (2.57)$$

Повні переміщення частинки в позитивному і в негативному напрямках осі у отримаємо відповідно з рівнянь (2.56) і (2.57), підставивши в рівняння (2.56) та (2.57).

$$y_+ = A \cdot \left[(\cos \delta_{1+} + Z_+ \delta_{1+}) \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}) - (\sin \delta_{2+} - \sin \delta_{1+}) - Z_+ \cdot \frac{\delta_{2+}^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (2.58)$$

$$y_- = A \cdot \left[(\cos \delta_{1-} + Z_- \delta_{1-}) \cdot (\delta_{2-} - \delta_{1-}) - (\sin \delta_{2-} - \sin \delta_{1-}) - Z_- \cdot \frac{\delta_{2-}^2 - \delta_{1-}^2}{2} \right]. \quad (2.59)$$

Виконаємо перетворення рівнянь (2.58) і (2.59) для випадку ковзання частинки відносно поверхні в режимі 2.

$$\delta_{2+} = \delta_{1+} + \pi. \quad (2.60)$$

Після підстановки рівнянь (2.28) і (2.60) в рівняння (2.58) і перетворень отримуємо:

$$y_+ = A \cdot \left(\pi \cos \delta_{1+} + 2 \sin \delta_{1+} - \frac{Z_+ \pi^2}{2} \right). \quad (2.61)$$

Підставами вираз фазового кута з рівняння (2.47) в рівняння (2.61), після перетворень отримаємо:

$$y_+ = 2A \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\pi Z_+}{2} \right)^2}. \quad (2.62)$$

$$\delta_{2-} = \delta_{1-} + \pi. \quad (2.63)$$

Після підстановки рівнянь (2.29), (2.63), першого рівняння системи (2.25) і рівняння (2.48) в рівняння (2.59), маючи на увазі, що після перетворень отримаємо:

$$y_- = -2A \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\pi Z_+}{2} \right)^2}. \quad (2.64)$$

Розглянемо випадок, коли частинка рухається відносно поверхні вздовж осі y в режимі 1 - двостороннє ковзання з двома паузами.

Підставами рівняння (2.52) і (2.53) в рівняння (2.59).

$$y_- = -A \cdot \left[(\cos \delta_{1+} + Z_+ \delta_{1+}) \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}) - (\sin \delta_{2+} - \sin \delta_{1+}) - Z_+ \cdot \frac{\delta_{2+}^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (2.65)$$

Представлені вище докази підтверджують положення про відсутність спрямованого в середньому переміщення частинки в разі симетрії рушійних сил і сил опору незалежно від режиму руху (режим 1 або режим 2) для розглянутого нами процесу вібраційного переміщення.

Розглянемо рух частинки в напрямку осі x за умови: частка робить рух щодо поверхні в режимі 2 - рух без пауз (з двома миттєвими зупинками). Як зазначено вище, частка може здійснювати рух щодо робочої поверхні тільки в позитивному напрямку осі x .

$$\dot{x}(\delta) = \frac{g}{\omega} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot (\delta - \delta_{1+}). \quad (2.66)$$

$$x(\delta) = \frac{g}{\omega^2} \cdot \left[-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \delta_{1+} \cdot (\delta - \delta_{1+}) + (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (2.67)$$

$$x_+ = \frac{2\pi^2 g}{\omega^2} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu). \quad (2.68)$$

Середня швидкість частинки уздовж осі x визначається за формулою:

$$V_{\text{CP}} = \frac{x_+ \omega}{2\pi} = \frac{\pi g (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu)}{\omega}. \quad (2.69)$$

Розглянемо рух частинки в напрямку осі x за умови: частка робить рух щодо поверхні в режимі 1 - рух з двома паузами.

$$\dot{x}(\delta) = \frac{g}{\omega} \cdot (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot (\delta - \delta_{1-}). \quad (2.70)$$

$$x(\delta) = \frac{g}{\omega^2} \cdot \left[-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \delta_{1-} \cdot (\delta - \delta_{1-}) + (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1-}^2}{2} \right]. \quad (2.71)$$

Отримаємо: повне переміщення частинки уздовж осі x на інтервалі її ковзання в позитивному напрямку осі y .

$$x_{+I} = \frac{g}{\omega^2} \left[-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \delta_{1+} \cdot (\delta_{2+} - \delta_{1+}) + (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \frac{\delta_{2+}^2 - \delta_{1+}^2}{2} \right]; \quad (2.72)$$

$$x_{+II} = \frac{g}{\omega^2} \left[-(\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \delta_{1-} \cdot (\delta_{2-} - \delta_{1-}) + (\sin \alpha - f_c \cos \alpha \sin \nu) \cdot \frac{\delta_{2-}^2 - \delta_{1-}^2}{2} \right]. \quad (2.73)$$

Швидкість частинки уздовж осі x визначається за формулою.

$$V_{CP} = \frac{(x_{+I} + x_{+II}) \cdot \omega}{2\pi}. \quad (2.74)$$

При побудові траєкторії частинки верхнього шару щодо робочої поверхні обчислюємо її координати y і x при однакових поточні значення фазового кута δ , що лежать в інтервалі значень, що відповідають інтервалам відносного руху матеріальної точки. При ковзанні частинки відносно поверхні в режимі 2 координату y обчислюємо за рівнянням (2.58) і (2.59).

Програма розрахунку для побудови траєкторії і визначення середньої швидкості V_{CP} транспортування частинок верхнього шару уздовж робочої поверхні (уздовж лінії найбільшого скату поверхні) приведена в Додатку А.

2.2.2. Рух нижнього шару

При дослідженні руху частинок нижнього шару розглядаємо елемент об'єму сипучого тіла між суміжними рифлями, вважаючи його матеріальною точкою. Вона пов'язана силами сухого тертя з вищележачим шаром, з опорною поверхнею і поперемінно з бічною поверхнею то однієї, то іншої рифлі. Відмінність справжнього завдання вібраційного переміщення полягає в тому, що похила робоча поверхня здійснює горизонтальні гармонійні коливання в напрямку, перпендикулярному лінії найбільшого скату поверхні, а рифлі у вигляді прямокутних пластин розташовані на поверхні паралельно лінії найбільшого скату, тобто перпендикулярно напрямку коливань [63-65].

На рис 2.5 зображена схема прийнятої моделі матеріальної частинки масою m_H і показані діючі на неї сили:

$$P_H = m_H A \omega^2 \sin \omega t - \text{сила інерції в переносному русі};$$

m_{Hg} - сила тяжіння частинки;

m_{Bg} - сила тяжіння частинки верхнього шару, розташованої над частинкою нижнього шару;

N_1 - нормальна реакція опорної поверхні робочого органу;

N_2 - нормальна реакція з боку бічної поверхні рифлі (пластини), з якою частинка має силовий контакт;

$F_1 = N_1 f_1$ - сила тертя об днище робочого органу, де f_1 - коефіцієнт тертя частинки об днище робочого органу;

$F_2 = N_2 f_2$ - сила тертя об бічну поверхню рифлі, з якої частинка має силовий контакт, де f_2 - коефіцієнт тертя частинки об бічну поверхню рифлі;

$F_{TP} = m_{Bg} f_c \cos \alpha$ - сила тертя з боку вищого шару.

Сила тертя F_{TP} спрямована проти відносної швидкості V_{H-B} нижнього шару відносно верхнього і як встановлено вище утворює з віссю u кут.

Як зазначено вище, рух верхнього шару зерноsumіші вздовж осі u можливий, згідно з термінологією І.І. Блехмана і В.В. Гортинського, у двох режимах: режим 1 - двостороннє ковзання з двома паузами; режим 2 - двостороннє ковзання без пауз (з двома миттєвими зупинками). Найбільш раціональним є режим двостороннього ковзання з двома миттєвими зупинками (режим 2), оскільки він дозволяє найбільш повно використовувати час перебування сепарованого матеріалу на поверхні робочого органу, оскільки процеси самосортування і просіювання частинок відбуваються переважно при їх відносному русі [66]. Тому дослідження руху частинок нижнього шару між суміжними рифлями (пластинами) розглянемо для випадку руху верхнього шару в режимі 2.

Внаслідок гармонійності коливань робочої поверхні і симетрії її шорсткості існує симетрія сил опору відносному руху і переносної сили інерції. Тому в першому наближенні будемо вважати рух верхнього шару вздовж осі u гармонійним і нехтуванням зрушенням фази відносно переносних коливань. Це припущення може бути обґрунтоване наступним чином [67]. По-перше, доведено, що верхній шар здійснює симетричні коливання відносно поверхні

при ковзанні вздовж осі y . По-друге, при русі в режимі 2 верхній шар половину періоду коливань робочої поверхні рухається в позитивному напрямку осі y і половину періоду в негативному напрямку.

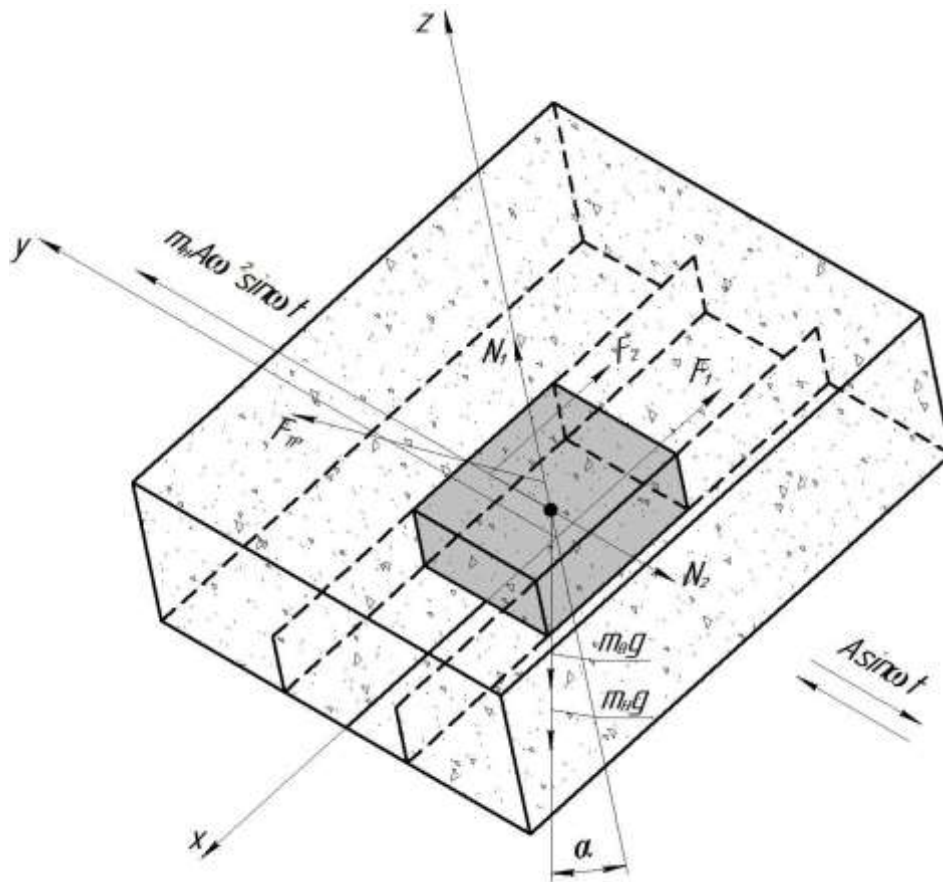


Рис. 2.5. Схема сил, що діють на частинку нижнього шару у відносному русі

Для визначеності подальших міркувань кут ν вважаємо позитивним, якщо він визначений між позитивним напрямом осі y і напрямком вектора сили тертя. На малюнку 2.5 представлена схема сил, що діють на частинку для випадку її силового контакту з лівою рифлею і при ковзанні верхнього шару в позитивному напрямку осі y . У цьому випадку сила тертя утворює з віссю y гострий кут, тобто $\nu = 90^\circ$. При цьому кут порожній згідно з прийнятим правилом його вимірювання має додатне значення [68]. У разі ковзання верхнього шару в негативному напрямку осі y сила тертя утворює з віссю y тупий кут, величина якого дорівнює 180° . Слід зауважити, що при ковзанні верхнього шару в протилежних напрямках сила тертя утворює з віссю y однакові за абсолютною величиною кути, тобто при ковзанні верхнього шару в позитивному напрямку осі y сила тертя утворює з цією віссю кут порожній, а при ковзанні в негативному

напрямку осі у. При ковзанні верхнього шару в від'ємному напрямку осі у кут порожній від'ємний, оскільки він вимірюється між від'ємним напрямком осі у та вектором сили тертя.

На рис. 2.6 показана схема сил, що діють на частинку в проекції на площину робочої поверхні. Рис. 2.6 а) відповідає випадку силового контакту частинки з лівою рифлею та ковзанню верхнього шару в позитивному напрямку осі у. На зображенні 2.6 б) показано схему сил, що діють на частинку в разі її силового контакту з правою рифлею, і ковзання верхнього шару в негативному напрямку осі у [68].

Диференціальні рівняння відносного руху частинки нижнього шару в проекціях на осі координат при силовому контакті з лівою рифлею (пластиною) на інтервалі зміни фазового кута мають вигляд:

$$m_H \ddot{x} = -F_1 - F_2 + (m_H + m_B)g \sin \alpha + m_B g f_c \cos \alpha \sin \nu, \quad (2.75)$$

$$m_H \ddot{y} = m_H A \omega^2 \sin \omega t - N_2 + m_B g f_c \cos \alpha \cos \nu, \quad (2.76)$$

$$m_H \ddot{z} = N_1 - (m_H + m_B)g \cos \alpha. \quad (2.77)$$

Рух частинки відносно робочої поверхні відбувається без підкидання, оскільки поверхня здійснює горизонтальні коливання і вектор прискорення всякої точки поверхні лежить в її площині.

Оскільки рух частинки відбувається без підкидання, то:

$$N_1 = (m_H + m_B)g \cos \alpha. \quad (2.78)$$

$$N_2 = m_H A \omega^2 \sin \omega t + m_B g f_c \cos \alpha \cos \nu. \quad (2.79)$$

Після підстановки виразів сил N_1 і N_2 відповідно з рівнянь (2.78) і (2.79) на рівняння (2.75) і перетворень отримаємо:

$$\ddot{x} = A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2 \left\{ \frac{g}{A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2} \left[\mu f_c \cos \alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos \rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos \rho_1} \right] - \sin \delta \right\}. \quad (2.80)$$

$$a = A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2, \quad (2.81)$$

$$Z_+^{\text{п}} = \frac{g}{A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2} \left[\mu f_c \cos \alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos \rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos \rho_1} \right]. \quad (2.82)$$

$$\ddot{x} = a \cdot (Z_+^{\text{II}} - \sin \delta). \quad (2.83)$$

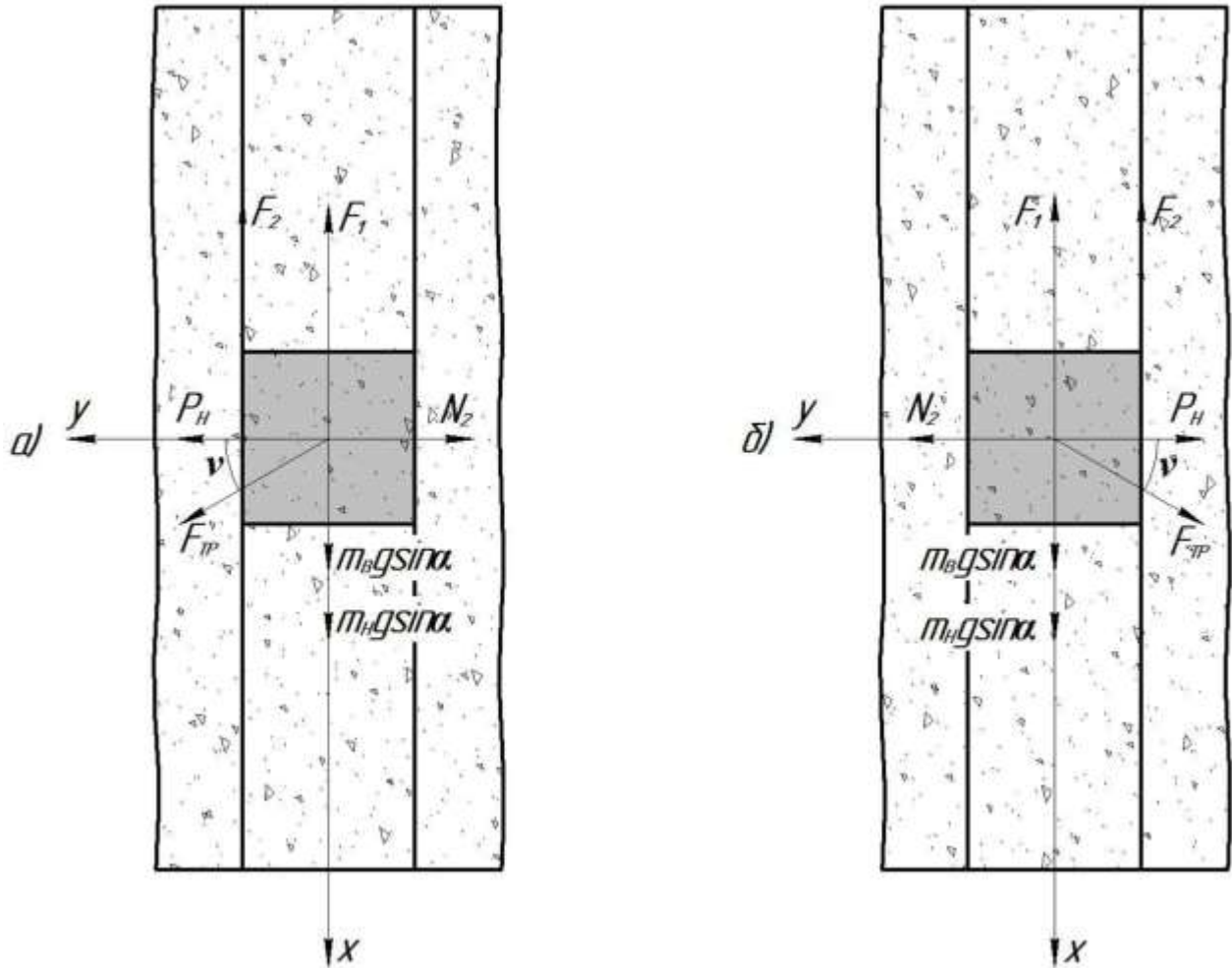


Рис. 2.6. Схема сил, що діють на частинку, в проекції на площину робочої поверхні:

- а) - силовий контакт частинки з лівою рифлею при ковзанні верхнього шару в позитивному напрямку осі y ; б) - силовий контакт частки з правих рифлів при ковзанні верхнього шару в негативному напрямку осі y .

При силовому контакті частинки з правою рифлею та ковзанні верхнього шару в негативному напрямку осі y диференційне рівняння відносного руху частинки нижнього шару в проекції на вісь y має вигляд:

$$m_H \ddot{y} = m_H A \omega^2 \sin \delta + N_2 - m_B g f_c \cos \alpha \cos \nu. \quad (2.84)$$

Зазначимо, що в цьому випадку диференційні рівняння відносного руху частинки нижнього шару в проекціях на осі x і z мають відповідно вид рівнянь

(2.75) і (2.77). Це є наслідком того, що частинка нижнього шару може здійснювати рух тільки в позитивному напрямку осі x (рис. 2.6).

$$N_2 = m_B g f_c \cos \alpha \cos \nu - m_H A \omega^2 \sin \omega t. \quad (2.85)$$

$$\ddot{x} = A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2 \left\{ \sin \delta + \frac{g}{A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2} \left[\mu f_c \cos \alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos \rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos \rho_1} \right] \right\}. \quad (2.86)$$

$$Z_1^{\text{II}} = \frac{g}{A \omega^2 \operatorname{tg} \rho_2} \left[\mu f_c \cos \alpha \frac{\sin(\nu - \rho_2)}{\cos \rho_2} - (1 + \mu) \frac{\sin(\rho_1 - \alpha)}{\cos \rho_1} \right]. \quad (2.87)$$

$$\ddot{x} = a(Z_1^{\text{II}} + \sin \delta). \quad (2.88)$$

Узагальнення рівняння відносного руху частинки нижнього шару між суміжними рифлями, дає:

$$\ddot{x} = a(Z - \sin \delta) \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi, \quad (2.89)$$

$$\ddot{x} = a(Z + \sin \delta) \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (2.90)$$

$$Z - \sin \delta > 0 \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi \quad (2.91)$$

$$Z + \sin \delta > 0 \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (2.92)$$

Режим ковзання частинки без пауз не становить практичного інтересу, оскільки в цьому режимі швидкість транспортування частинок сипучого тіла по опорній поверхні робочого органу зростає від періоду до періоду коливань. Збільшення середньої швидкості потоку зменшує час сепарування, зменшення часу процесу сепарування завжди зменшує його ефективність. Тому практичний інтерес представляє режим відносного ковзання частинки з паузами. Як зазначено, якісні характеристики режимів відносного руху слід розглядати за період коливань робочої поверхні. Отже, запропонований для подальшого розгляду режим відносного руху частинки може бути охарактеризований наступним чином: одностороннє ковзання частинки з двома паузами.

Відомо, що під час вивчення руху частинки відносно поверхні, що коливається, можна, не обмежуючи спільності, вважати, що початкова швидкість x_H частинки дорівнює нулю. Далі можливі два типи руху: 1 - те, що миттєво починається ковзання частинки в позитивному напрямку осі x ; 2 -

відносний спокій (пауза - тривала зупинка). Тому, весь інтервал часу (фазового кута), протягом якого розглядаємо відносний рух частинки, можна розбити на наступні два підінтервали: підінтервал, в будь-який момент часу якого частинка, що має початкову швидкість рівну нулю, миттєво починає ковзання в позитивному напрямку осі x ; підінтервал, в будь-який момент часу якого частинка, що має швидкість, рівну нулю, продовжує залишатися в стані відносного спокою. Перший з перерахованих вище підінтервалів позначимо I_+ , другий підінтервал - I_0 . Слід зауважити, що частинка, яка має швидкість рівну нулю на підінтервалі I_0 , продовжує залишатися в стані відносного спокою до миті переходу до підінтервалу I_+ .

Розбиття тимчасової осі на підінтервали представлено на рис. 2.7. На рис 2.7 побудований графік функції $y_a = \sin \delta$, а також проведені прямі $y_a = Z$ і $y_a = -Z$. Абсциси точок перетину прямих з синусоїдою визначають межі вказаних вище інтервалів.

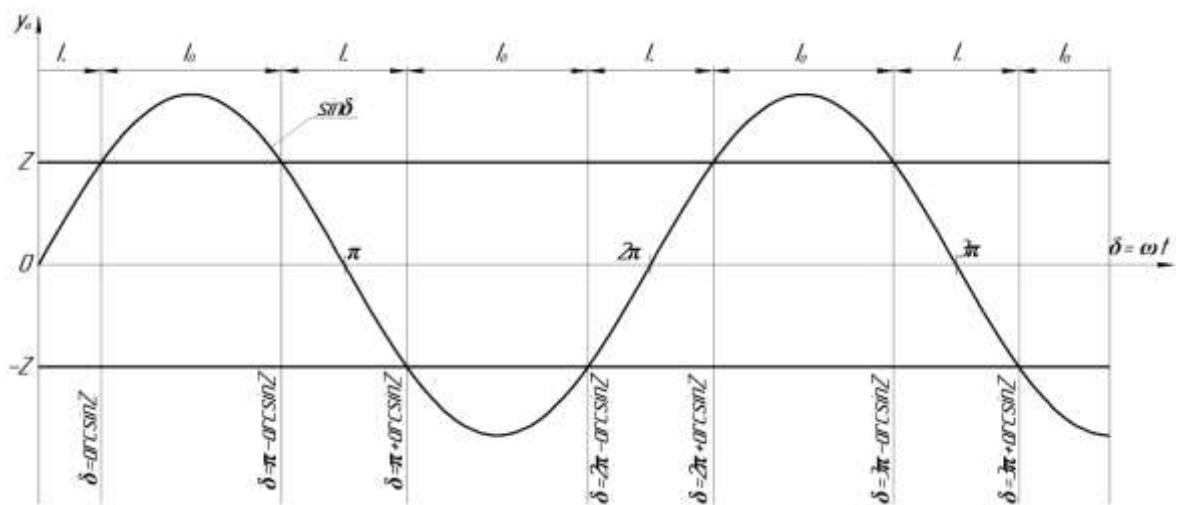


Рис. 2.7. Розбиття тимчасової осі (осі фазового кута $\delta = \omega t$) на підінтервали

Підінтервал I_+ володіє наступною властивістю: частинка, що робить ковзання в позитивному напрямку осі x , не може зупинитися в будь-який момент часу, що належить цьому підінтервалу. Дійсно, якщо $x \geq 0$, то з нерівностей (2.91) і (2.92) слідує, що при будь-якому значенні фазового кута δ (безрозмірного часу), належить інтервалу I_+ прискорення відповідно $x \geq 0$.

Отже, швидкість x зростає і не може бути нуль. Підінтервал I_0 має таку властивість: на підінтервалі частинка або здійснює рух відносно поверхні, або

можлива її зупинка. Якщо на кінтервалі I_0 можлива зупинка частинки, то це означає, що частинка здійснює рух відносно поверхні в режимі з паузами. При цьому тривалість паузи дорівнює інтервалу часу з моменту зупинки частинки до межі закінчення інтервалу I_0 і початку наступного за ним підінтервалу I_+ . Очевидно, що якщо на підінтервалі I_0 частинка не зупиняється, то це означає, що вона здійснює рух відносно робочої поверхні в режимі ковзання без пауз, тобто здійснює рух у режимі безперервного ковзання. Зазначимо, що на підінтервалі I_+ частинка рухається відносно поверхні прискорено, а на підінтервалі I_0 - уповільнено.

Як зазначено вище, якщо частинка здійснює рух відносно робочої поверхні в режимі з паузами, то швидкість частинки може звертатися в нуль тільки на підінтервалі I_0 .

Рівняння (2.89) і (2.90) в безрозмірному вираженні відповідно мають вигляд:

$$x'' = Z - \sin \delta \quad \text{при } 0 \leq \delta \leq \pi \quad (2.93)$$

$$x'' = Z + \sin \delta \quad \text{при } \pi \leq \delta \leq 2\pi. \quad (2.94)$$

Відповідно до прийнятого умові частка після паузи починає рух щодо робочої поверхні при

$$\delta_{1-1} = \pi - \arcsin Z. \quad (2.95)$$

Зауважимо, що δ_{1-1} являє собою момент часу в безрозмірному вираженні (фазовий кут) початку відносного руху частинки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні.

$$x'(\delta) = Z(\delta - \delta_{1-1}) + \cos \delta - \cos \delta_{1-1}. \quad (2.96)$$

$$x'_{k1} = Z(\pi - \delta_{1-1}) - 1 - \cos \delta_{1-1}. \quad (2.97)$$

Для визначення залежності швидкості на наступному інтервалі відносного руху частинки проінтегруємо рівняння (2.94).

$$x'(\delta) - x'_{H1} = Z(\delta - \pi) - (\cos \delta - \cos \pi). \quad (2.98)$$

$$x'(\delta) = Z\delta - \cos \delta - 2 - Z\delta_{1-1} - \cos \delta_{1-1}. \quad (2.99)$$

В мить закінчення ковзання частинки відносно робочої поверхні швидкість x стає рівною нулю.

$$Z\delta_{2-1} - \cos \delta_{2-1} = 2 + Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1}. \quad (2.100)$$

Вирішуючи рівняння (2.100), визначаємо момент часу, що відповідає миті припинення відносного ковзання частинки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні.

$$\delta_{2-1} < 2\pi - \arcsin Z. \quad (2.101)$$

Частинка здійснює рух відносно робочої поверхні в режимі ковзання без пауз. Тобто, в цьому випадку частинка рухається в режимі безперервного ковзання. При цьому режим ковзання з паузами переходить в режим безперервного ковзання при виконанні умови:

$$\delta_{2-1} = 2\pi - \arcsin Z. \quad (2.102)$$

$$\pi Z = 2. \quad (2.103)$$

$$Z = \frac{2}{\pi}. \quad (2.104)$$

Слід зауважити, що значення параметра Z , що визначає межу зазначених режимів відносного руху, отримано при дослідженні руху частинки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні.

Розгляньмо відносний рух частинки у другому напівперіоді коливань поверхні.

Після паузи частинка в другому напівперіоді коливань поверхні починає відносне ковзання при:

$$\delta_{1-2} = 2\pi - \arcsin Z. \quad (2.105)$$

$$x'(\delta) = Z(\delta - \delta_{1-2}) - (\cos \delta - \cos \delta_{1-2}). \quad (2.106)$$

$$x'_{K2} = Z(2\pi - \delta_{1-2}) - 1 + \cos \delta_{1-2}. \quad (2.107)$$

$$x'(\delta) = x'_{H2} + Z(\delta - 2\pi) + \cos \delta - \cos 2\pi. \quad (2.108)$$

$$x'(\delta) = Z\delta + \cos \delta - 2 - Z\delta_{1-2} + \cos \delta_{1-2}. \quad (2.109)$$

В мить закінчення ковзання частинки відносно робочої поверхні швидкість x стає рівною нулю.

$$Z\delta_{2-2} + \cos \delta_{2-2} = 2 + Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2}. \quad (2.110)$$

Вирішуючи останнє рівняння щодо визначаємо момент часу відповідний миті припинення відносного ковзання частинки.

Режим ковзання з паузами переходить в режим безперервного ковзання при виконанні умови:

$$\delta_{2-2} = 3\pi - \arcsin Z. \quad (2.111)$$

З наведених вище доказів можна зробити наступний висновок. При $Z \leq 0.64$ сталим режимом руху частинки відносно хитається поверхні є режим одностороннього ковзання з двома паузами. При $Z \geq 0.64$ частка робить рух щодо поверхні в режимі одностороннього ковзання без пауз, тобто в режимі безперервного ковзання в одному напрямку.

$$\delta_{1-2} = \delta_{1-1} + \pi. \quad (2.112)$$

На малюнку 2.8 представлені залежності фазових кутів початку і закінчення відносного руху матеріальної точки в першому і другому напівперіодах коливань робочої поверхні. Для побудови залежностей були виконані розрахунки значень кутів відповідно за формулами (2.95) і (2.105) для різних значень параметра Z , що відповідають умові відносного руху матеріальної точки в режимі ковзання з двома паузами.

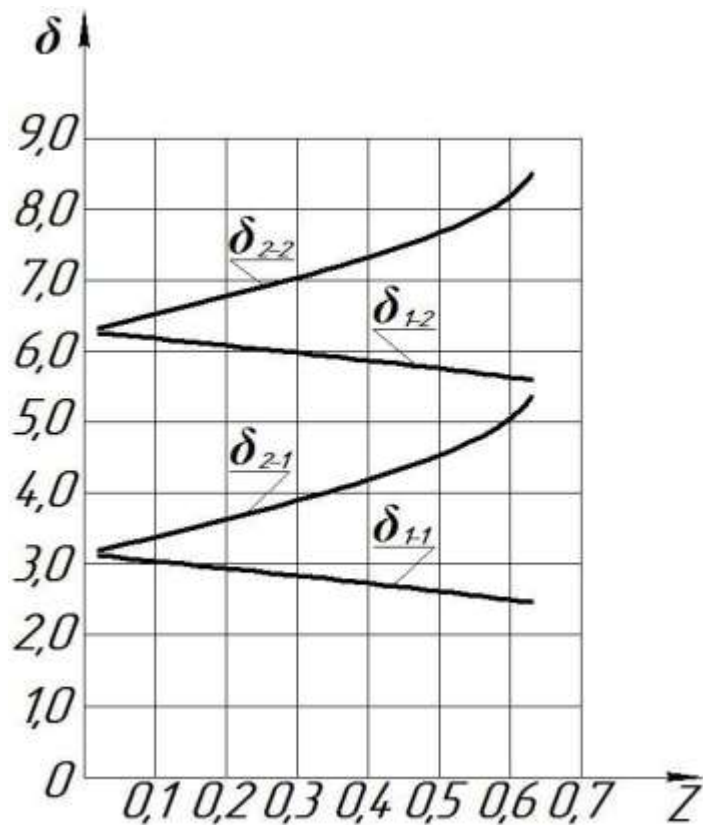


Рис. 2.8. Залежності фазових кутів початку і закінчення відносного руху частинки в першому і другому напівперіодах коливань робочої поверхні.

При ковзанні частинки відносно поверхні в режимі з паузами фазові кути відрізняються один від одного на величину π .

$$\delta_{2-2} = \delta_{2-1} + \pi. \quad (2.113)$$

Тривалість інтервалу відносного руху матеріальної точки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні дорівнює:

$$\Delta\delta_I = \delta_{2-1} - \delta_{1-1}. \quad (2.114)$$

Тривалість інтервалу відносного руху матеріальної точки в другому напівперіоді коливань робочої поверхні дорівнює:

$$\Delta\delta_{II} = \delta_{2-2} - \delta_{1-2}. \quad (2.15)$$

$$\Delta\delta_{II} = \delta_{2-1} - \delta_{1-1}. \quad (2.16)$$

З рівнянь (2.114) і (2.116) видно, що тривалість інтервалу відносного руху матеріальної точки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні дорівнює тривалості інтервалу відносного руху матеріальної точки в другому напівперіоді

коливань поверхні.

Порівнюємо залежності швидкості частинки в першому і в другому напівперіодах коливань робочої поверхні.

Розгляньмо залежність швидкості, які представлені рівняннями (2.96) і (2.106). Рівняння (2.96) є залежністю швидкості частинки на інтервалі часу. Рівняння (2.106) є залежністю швидкості на інтервалі. Підставимо рівняння (2.106) в рівняння (2.112).

$$x'(\delta) = Z(\delta - \delta_{1-1}) - Z\pi - (\cos \delta + \cos \delta_{1-1}). \quad (2.117)$$

Як зазначено вище, інтервали відносного руху матеріальної точки в першому і другому напівперіодах коливань робочої поверхні мають однакову тривалість за часом. При цьому значення моменту часу, відповідне початку відносного руху матеріальної точки в першому напівперіоді коливань робочої поверхні, відрізняється від значення моменту часу початку відносного руху матеріальної точки в другому напівперіоді коливань поверхні на величину π . Значення моментів часу закінчення відносного руху матеріальної точки в першому напівперіоді коливань поверхні відрізняється від значення моменту часу закінчення відносного руху в другому напівперіоді коливань на величину π .

З представлених міркувань випливає, що кожному поточного значення безрозмірного часу δ в першому напівперіоді коливань поверхні відповідає поточне значення безрозмірного часу в другому напівперіоді коливань. Отже для порівняння залежностей швидкості частинки в першому і в другому напівперіодах коливань поверхні в рівнянні, що описує залежність швидкості в другому напівперіоді коливань, до поточного значення часу δ необхідно додати π . Тоді рівняння (2.117) набуває вигляду:

$$x'(\delta) = Z(\delta + \pi - \delta_{1-1}) - Z\pi - [\cos(\delta + \pi) + \cos \delta_{1-1}]. \quad (2.118)$$

Розглянемо залежності швидкості, які представлені рівняннями (2.99) і (2.109). Рівняння (2.99) є залежністю відносної швидкості частки на інтервалі часу.

Таким чином, доведено, що залежність відносної швидкості частинки в

першому напівперіоді коливань робочої поверхні збігається з залежністю відносно швидкості частки в другому напівперіоді коливань поверхні.

$$x(\delta) = Z \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1-1}^2}{2} + \sin \delta - \sin \delta_{1-1} - (Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\delta - \delta_{1-1}). \quad (2.119)$$

Після перетворень отримаємо:

$$x_{1+1} = Z \cdot \frac{\pi^2 - \delta_{1-1}^2}{2} - \sin \delta_{1-1} - (Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\pi - \delta_{1-1}). \quad (2.120)$$

$$x(\delta) = x_{1+1} + Z \cdot \frac{\delta^2 - \pi^2}{2} - \sin \delta - (2 + Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\delta - \pi). \quad (2.121)$$

Для визначення повного переміщення частинки відносно робочої поверхні за перший напівперіод її коливань підставимо в останнє рівняння:

$$x_{1+} = x_{1+1} + Z \cdot \frac{\delta_{2-1}^2 - \pi^2}{2} - \sin \delta_{2-1} - (2 + Z\delta_{1-1} + \cos \delta_{1-1})(\delta_{2-1} - \pi). \quad (2.122)$$

$$x(\delta) = Z \cdot \frac{\delta^2 - \delta_{1-2}^2}{2} - (\sin \delta - \sin \delta_{1-2}) - (Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(\delta - \delta_{1-2}). \quad (2.123)$$

Після перетворень отримаємо:

$$x_{1+2} = Z \cdot \frac{4\pi^2 - \delta_{1-2}^2}{2} + \sin \delta_{1-2} - (Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(2\pi - \delta_{1-2}). \quad (2.124)$$

$$x(\delta) = x_{1+2} + Z \cdot \frac{\delta^2 - 4\pi^2}{2} + \sin \delta - (2 + Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(\delta - 2\pi). \quad (2.125)$$

Для визначення повного переміщення частинки відносно робочої поверхні за другий напівперіод її коливань, підставимо в рівняння (2.125) значення поточного безрозмірного часу, рівне:

$$x_{2+} = x_{1+2} + Z \cdot \frac{\delta_{2-2}^2 - 4\pi^2}{2} + \sin \delta_{2-2} - (2 + Z\delta_{1-2} - \cos \delta_{1-2})(\delta_{2-2} - 2\pi). \quad (2.126)$$

З огляду на взаємозв'язок між моментами початку і закінчення відносного руху матеріальної точки, а також взаємозв'язок між поточними значеннями безрозмірного часу d в першому і в другому напівперіодах коливань робочої поверхні доводимо такі умови відносного руху матеріальної точки.

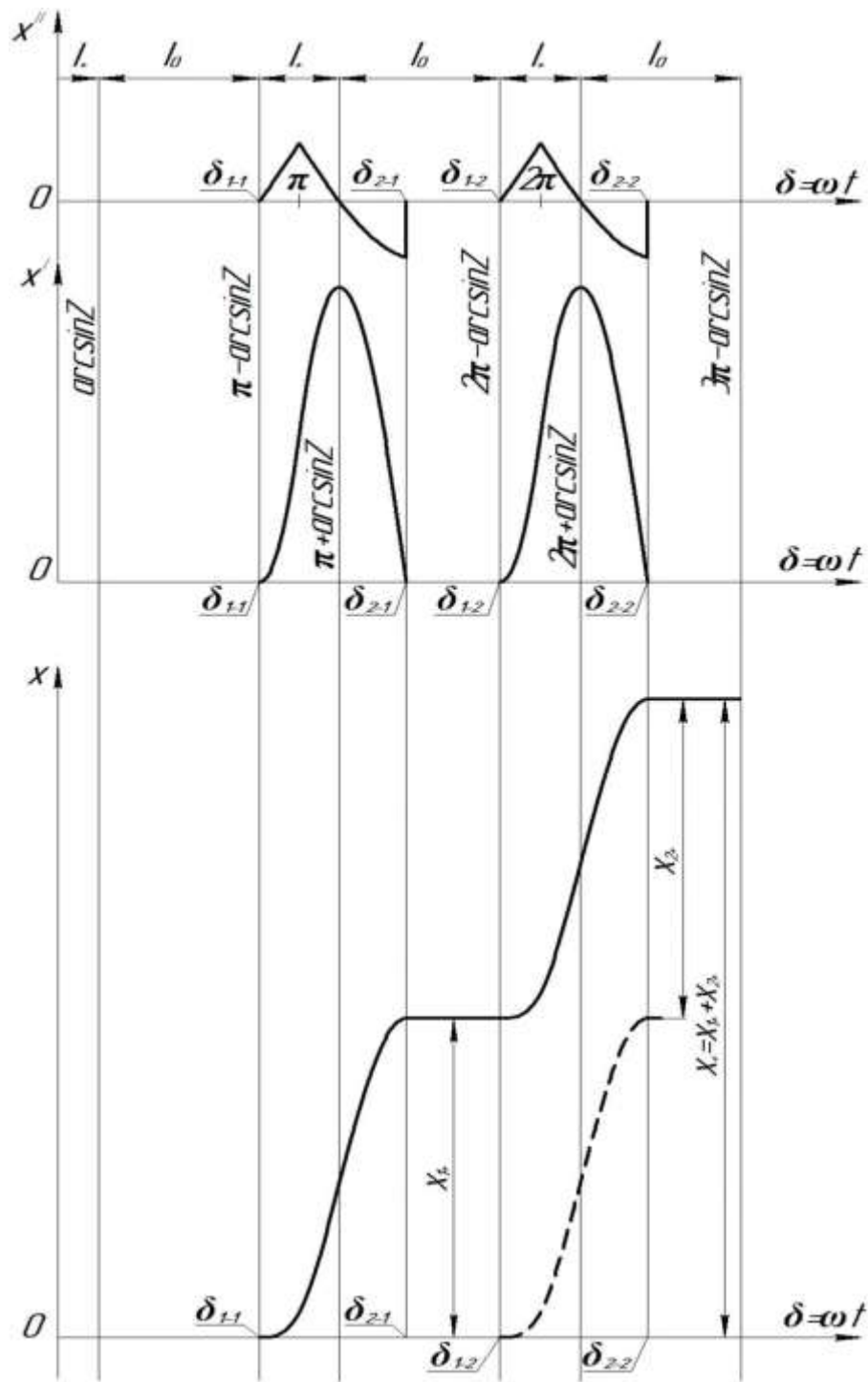


Рис. 2.9. Залежності прискорення, швидкості і переміщення частинки в безрозмірному вираженні за період коливань робочої поверхні

На рис. 2.9 показана розбивка тимчасової осі на підінтервали I_0 і I_+ . Як видно з графіків (рис. 2.9), частинка починає відносний рух на кордоні підінтервалів I_0 і I_+ . На кінтервалі I_+ частинка рухається прискорено - прискорення частинки позитивно. На кінтервалі I_0 частинка рухається

уповільнено і зупиняється. На графіках залежності переміщення частинки пунктирною лінією показана залежність відносного переміщення частинки у другому напівперіоді коливань робочої поверхні. Суцільною лінією показана залежність переміщення частинки за період коливань поверхні. З графіків видно, що переміщення частинки за перший напівперіод коливань поверхні дорівнює переміщенню частинки за другий напівперіод коливань поверхні. Тоді повне переміщення частинки в безрозмірному вираженні за період коливань поверхні можна представити у вигляді:

$$x_+ = x_{1+} + x_{2+} = 2x_{1+} = 2x_{2+}. \quad (2.127)$$

Величина безрозмірної середньої швидкості частинки у встановленому русі при її ковзанні відносно поверхні в режимі одностороннього ковзання з двома паузами визначається за формулою.

$$x'_{CP} = \frac{x_+}{2\pi} = \frac{x_{1+} + x_{2+}}{2\pi}. \quad (2.128)$$

У даному випадку формула (2.128) може бути представлена у вигляді:

$$x'_{CP} = \frac{x_{1+}}{\pi} = \frac{x_{2+}}{\pi}. \quad (2.129)$$

На малюнку 2.10 представлена залежність переміщення частинки в безрозмірному вираженні за половину періоду коливань робочої поверхні від безрозмірного параметра Z . Слід зауважити, що графік (рис. 2.10) дозволяє при відомому значенні параметра Z визначити величину безрозмірного переміщення частинки x_{1+} за половину періоду коливань поверхні, а потім визначити величину безрозмірної середньої швидкості частинки.

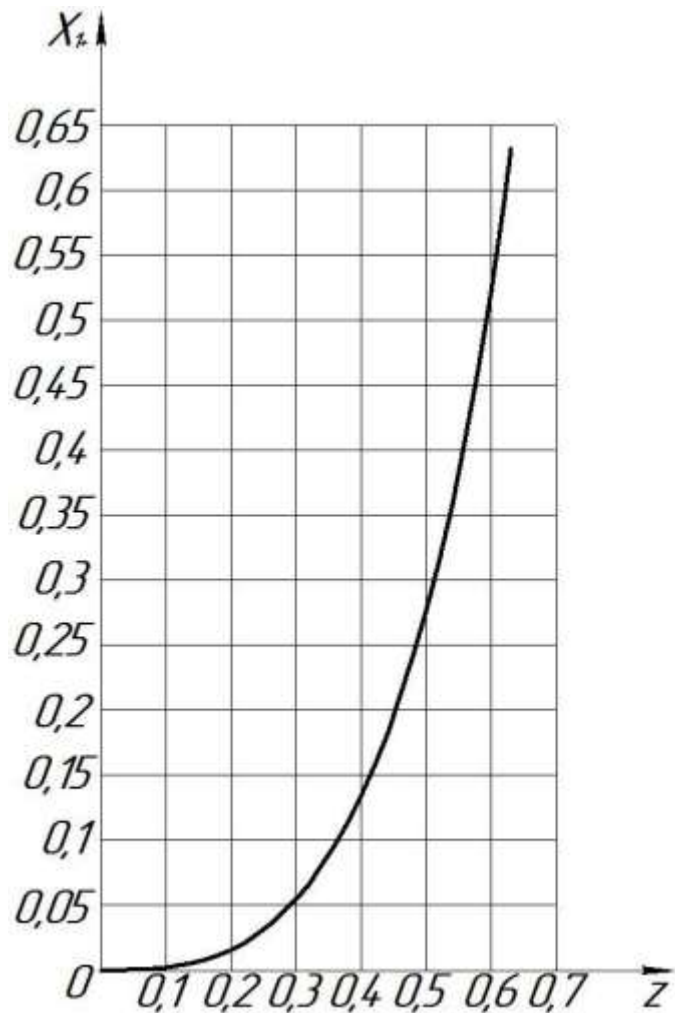


Рис. 2.10. Залежність безрозмірного пересування частинки від параметра Z за половину періоду коливань робочої поверхні

Перехід від величини безрозмірної середньої швидкості частинки x_{CP} до величини розмірної середньої швидкості V_{CP} здійснюють шляхом множення безрозмірної величини середньої швидкості на коефіцієнт, рівний $\frac{a}{\omega} = A \omega g \rho_2$.

2.3. Аналіз траєкторій частинок сипучого зернового потоку

Отримані в п. 2.2 результати аналітичного дослідження руху частинок верхнього шару зернового потоку дозволяють побудувати траєкторії частинок з урахуванням можливих змінних параметрів. В якості змінних величин були обрані: частота коливань робочого органу, кут його нахилу до горизонту, амплітуда коливань, значення коефіцієнта опору.

Дослідження переміщення частинок по осях x і y , побудова їх траєкторій

представляє не тільки теоретичний інтерес, але і практичне значення, оскільки дозволяє оцінити технічну продуктивність, а так само час перебування частинок сипучого продукту в габаритах активного впливу робочого органу.

На рис 2.11 - 2.14 представлені траєкторії частинок верхнього шару для різних значень змінних параметрів, побудованих в осях координат x (уздовж лінії максимального скату і рифлів) і y (перпендикулярно x).

Для оцінки впливу окремих параметрів будемо розглядати переміщення частинок по осях x і y за повний цикл коливання робочого органу [69].

На рис. 2.11 відображено вплив коефіцієнта опору частинки f верхнього шару про нижній шар при зміні f від 0,5 (рис. 2.11 а) до 0,3 (рис. 2.11 в). При такому зменшенні коефіцієнта тертя амплітуду коливання частинки зросла в 1.25 разів, що пояснюється зменшенням сили опору і зростанням рушійної сили.

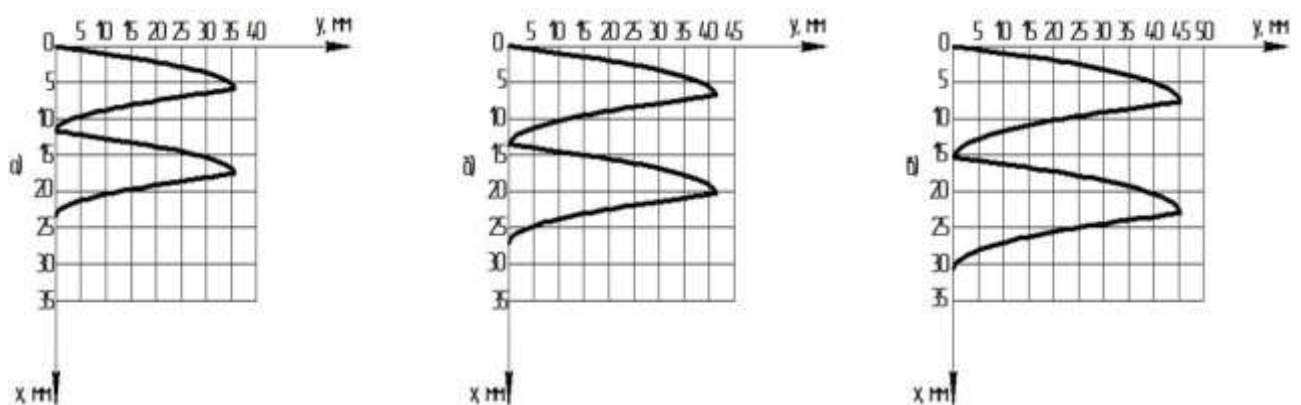


Рис. 2.11. Траєкторія частинки верхнього шару для різних значень коефіцієнта опору f , при $A = 0,025$ м; $n = 200$ кіл/хв; $a = 3,5^0$
а) - $f = 0,5$; б) - $f = 0,4$; в) - $f = 0,3$.

На рис. 2.12 показано вплив частоти коливань робочої поверхні n при зміні n від 300 кол/хв (малюнок 2.12 а) до 200 кіл/хв (рис. 2.12 в). При зменшенні n в 1,5 рази амплітуда зменшилася в 1,09 рази, а переміщення по осі x зросло в 1,88 рази.

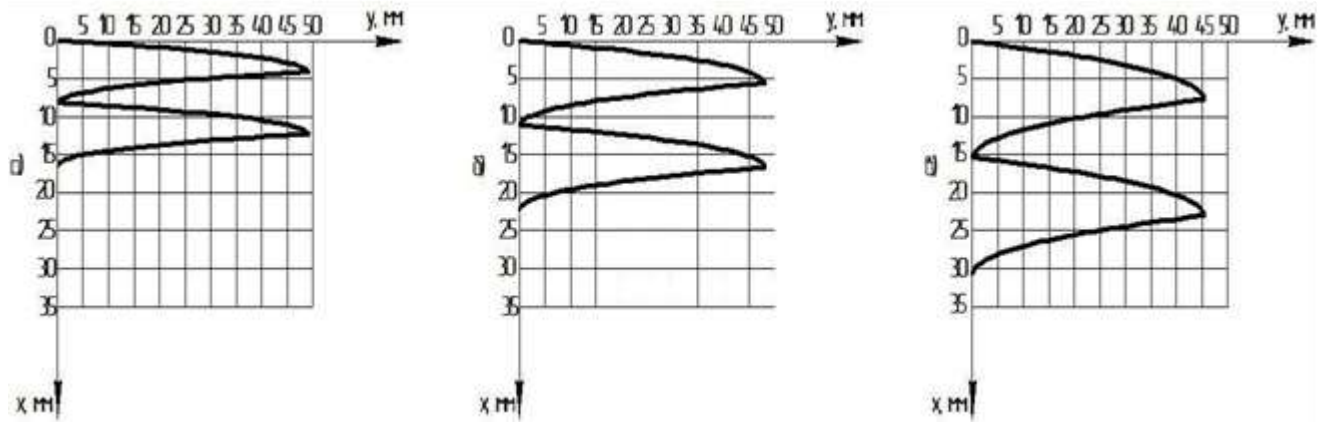


Рис. 2.12 Траєкторія частинки верхнього шару для різних значень частоти

коливань робочої поверхні, при $A = 0,025$ м; $a = 3,5$; $f = 0,3$:⁰

а) - $n = 300$ кіл/хв; б) - $n = 250$ кіл/хв; в) - $n = 200$ кіл/хв.

Вплив кута нахилу робочої поверхні при зменшенні від $4,50$ до $2,50$ показано на рис. 2.13. При такій зміні амплітуда частинки практично не змінилася, в той час як переміщення по осі x зменшилося в $2,0$ рази, що пояснюється зменшенням рушійної сили.

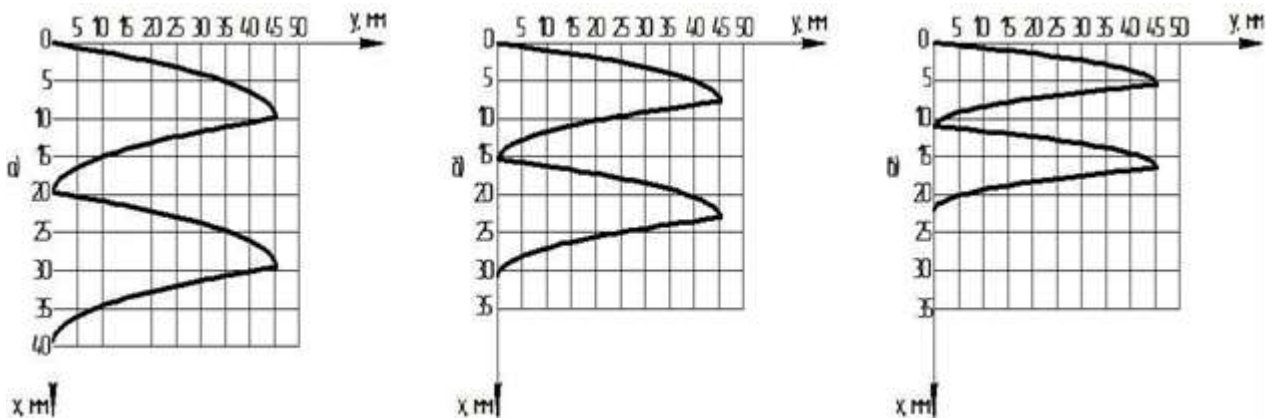


Рис. 2.13. Траєкторія частинки верхнього шару для різних значень кута a

нахилу робочої поверхні до горизонталі, при

$A = 0,025$ м; $n = 200$ кіл/хв; $f = 0,3$:

а) - $a = 4,5^0$; б) - $a = 3,5^0$; в) - $a = 2,5^0$

На рис. 2.14 показано вплив амплітуди коливань A робочої поверхні при зміні значень A від $0,03$ м (рис. 2.14 а) до $0,02$ м (рис. 2.14 в). При зменшенні показника амплітуди в $1,5$ рази переміщення частинки по осі y зменшилася в $1,6$ рази, а переміщення по осі x в $1,3$ рази.

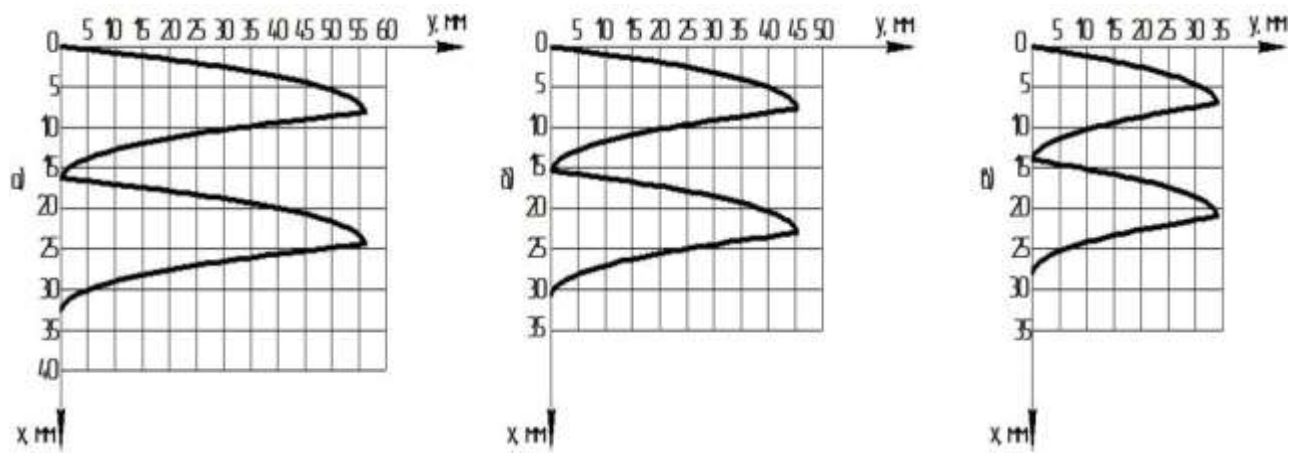


Рис. 2.14. Траекторія частинки верхнього шару для різних значень амплітуди A коливань робочої поверхні, при
 $n = 200$ кіл/хв; $a = 3,5^0$; $f = 0,3$
 а) - $A = 0,03$ м; б) - $A = 0,025$ м; в) - $A = 0,02$ м.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗСУВУ ЗЕРНОВОЇ МАСИ

3.1. Визначення коефіцієнтів опору зсуву шарів зерна

Розподіл коефіцієнтів опору зсуву шарів по товщині сипучого тіла при ковзанні його по опорній поверхні визначали за методикою, запропонованою В.В. Гортинським. Схема лабораторної установки представлена на рис 3.1.

Методика вимірювань полягала в наступному. Зерно поміщали на візок 3 установки з робочим органом. Після формування сипучого шару товщиною $H=30$ мм на його похилу поверхню поміщали пофарбовані частинки, що позначають шари сипучого тіла, і вимірювали їх координати за допомогою вбудованих штангенциркулів. При натисканні на фіксатор 5 під дією падаючого вантажу 2 візок рухався прискорено і, вдарившись об шток гальмівного пристрою 6, зупинявся. У момент початку прискореного руху візка (при натисканні на фіксатор 5) включався електричний секундомір 7. У момент удару візка об шток гальмівного пристрою секундомір вимикався. При гальмуванні візка відбувалося відносне зміщення шарів сипучого тіла [70]. Координати шарів після удару заміряли за допомогою вбудованих штангенциркулів. Схема вимірювання координат шарів показана на зображенні 3.2.

Коефіцієнти опору зсуву шарів розраховували, визначаючи абсолютні пересування пофарбованих частинок, розташованих у різних шарах за висотою сипучого тіла, за формулою.

$$f_{zp} = \frac{V_T^2}{2gS}, \quad (3.1)$$

Малюнок 3.1 - Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнтів опору зсуву шарів сипучого тіла: 1- станина; 2-падаючий вантаж; 3- візок; 4-го з робочим органом; 5- фіксатор; 6-гальмівний пристрій; 7- електричний секундомір.

де V_T - швидкість візки в момент удару об шток гальмівного пристрою, м/с;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

S - абсолютна переміщення шару, м.

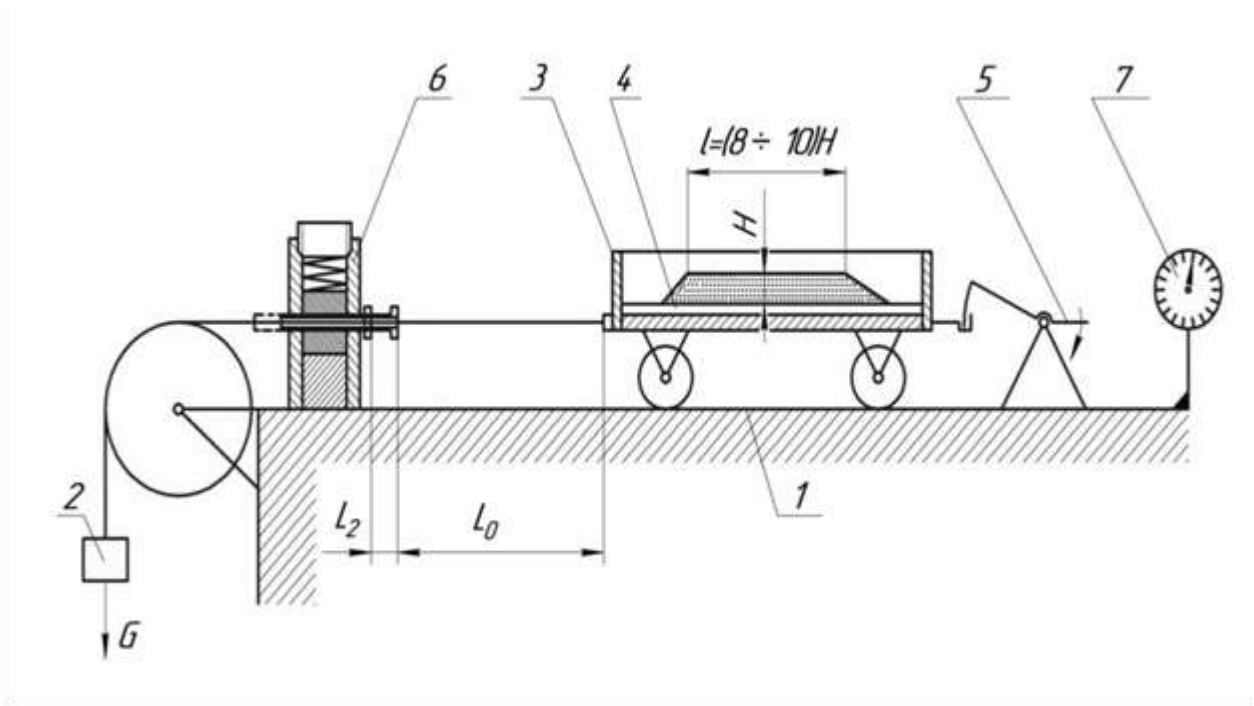


Рис. 3.1. Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнтів опору зсуву шарів сипучого тіла: 1 станина; 2-падаючий вантаж; 3 візок; 4-рама з робочим органом; 5 фіксатор; 6-гальмівний пристрій; 7- електричний секундомір.

Швидкість візка в момент удару об шток гальмівного пристрою визначали, використовуючи значення пройденого шляху L_0 за час t . Час вимірювали з точністю $\pm 0,01$ с. Всі експерименти проведені при швидкості візки $V_T = 0,885$ м/с і товщині шару зерносмісі $H = 30$ мм.

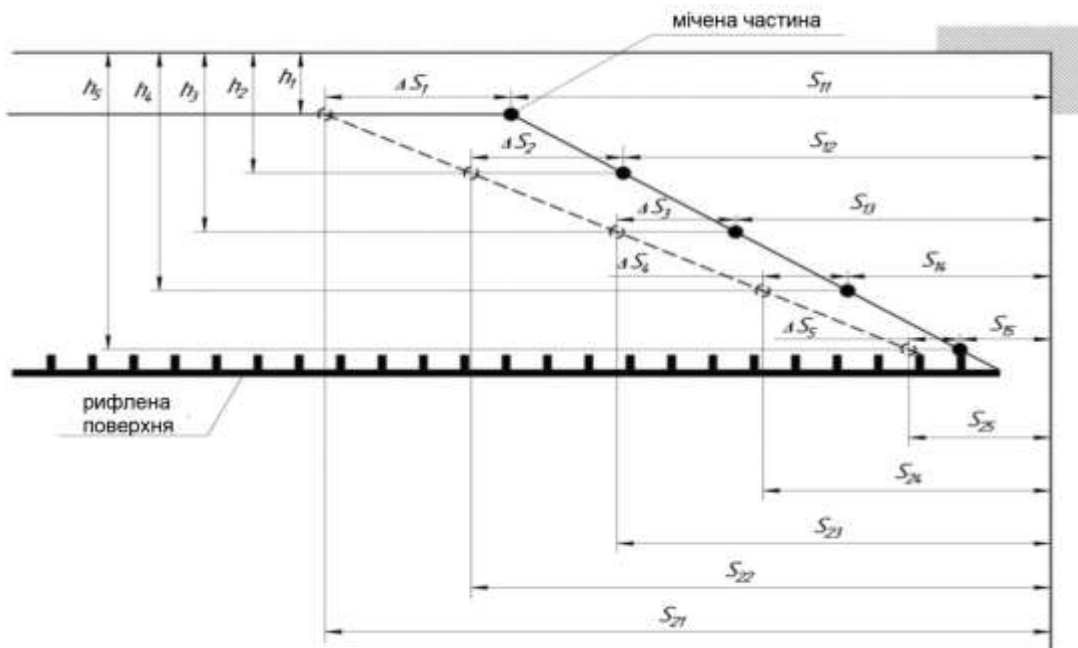


Рис. 3.2. Схема вимірювання координат шарів

Знайдені коефіцієнти опору зсуву шарів називають наведеними.

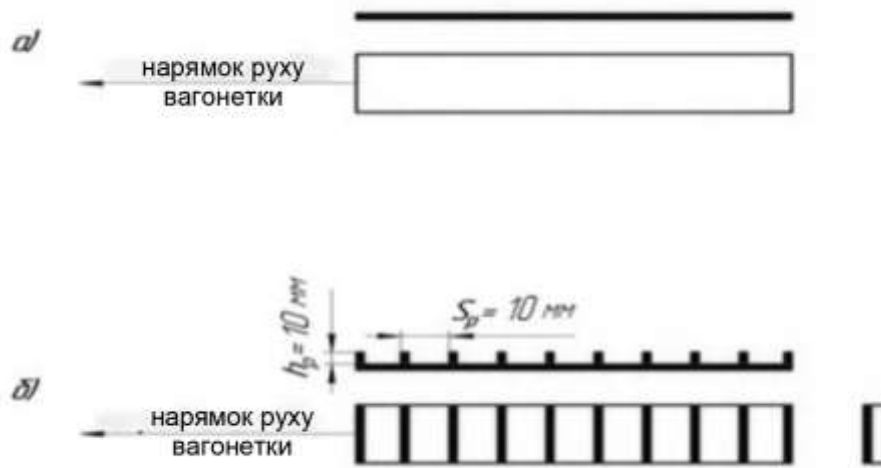


Рис. 3.3. Варіанти поверхонь, використані для вимірювання коефіцієнти опору зсуву шарів: а) - гладка поверхня; б) - рифлена поверхня.

У дослідженнях використовували гладку (рис. 3.3 а) і рифлену (рис. 3.3 б) поверхні. При гальмуванні візка з рифленою поверхнею відносно ковзання шару зернової суміші відбувалося поперечно вертикальним рифлям (рис. 3.3 б).

Залежності коефіцієнтів опору зсуву шарів по товщині зернової суміші представлені на рис. 3.4.

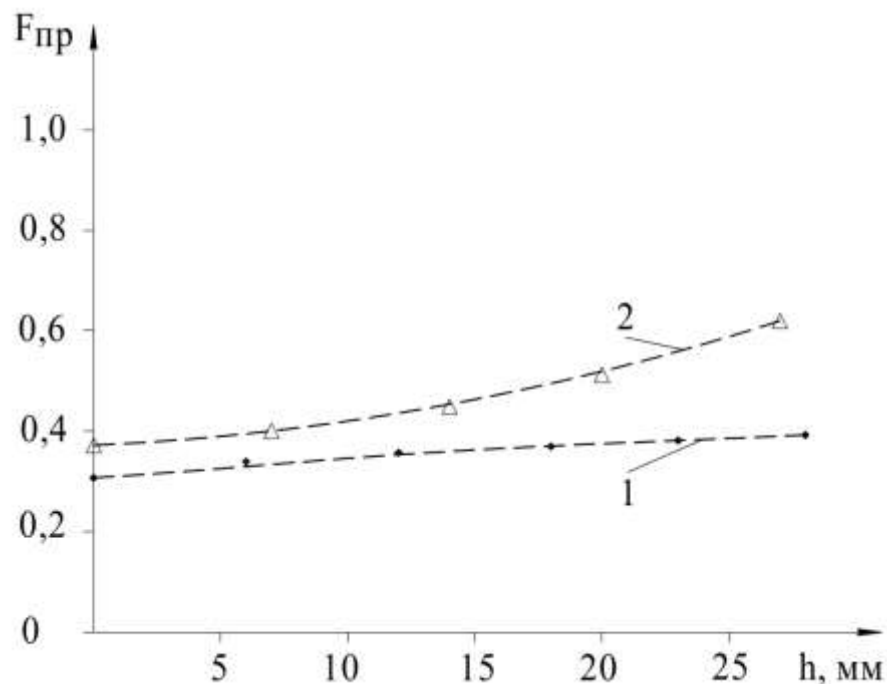


Рис. 3.4. Залежності коефіцієнтів опору зсуву шарів від товщини шару зернової суміші: 1 - гладка поверхня; 2 - $h_p = 10\text{мм}$ - поперечне ковзання зернової суміші відносно рифлів.

З розгляду графіків можна зробити такі висновки:

- при ковзанні зернової суміші по будь-якій з досліджуваних поверхонь коефіцієнт опору зсуву шарів збільшується по мірі наближення до цієї поверхні;

- при ковзанні зернової суміші по гладкій поверхні різниця

- найбільша різниця Δf_{np} відповідає поперечному ковзанню зернової суміші щодо рифлів, при цьому максимальна різниця дорівнює $\Delta f_{np} = 45\%$.

3.2. Дослідження ефективності процесу сепарування зерна

Обладнання складається з живителя, робочого органу, приводу робочого органу та ємностей для окремого збору продуктів верхнього і нижнього шарів зернового потоку.

Живитель початкової зернової суміші дозволяє рівномірно розподілити подану суміш із заданим питомим навантаженням, що визначає товщину продукту на робочому органі. Привід робочого органу включає електродвигун, клиночасну передачу, варіатор та ексцентриковий механізм.

Робочий орган (рис. 3.5) представляє собою сталеву опорну поверхню, нахилену до горизонту під незначним кутом, щоб в спокої поверхня була самотормозною і було відсутнє мимовільне ковзання зернової суміші.

Робочий орган 1 обмежений торцевою 2, двома бічними стінками 3 та опорною поверхнею, з виконаними на ній уздовж лінії найбільшого скату рифлями 4 виконаними у вигляді трапеції з висотою від 5мм до 20мм та з кроком 10 мм, між якими відбувається ковзання нижнього шару оброблюваної зернової суміші. Встановлений ніж розрізає зерновий потік на дві частини (фракції).

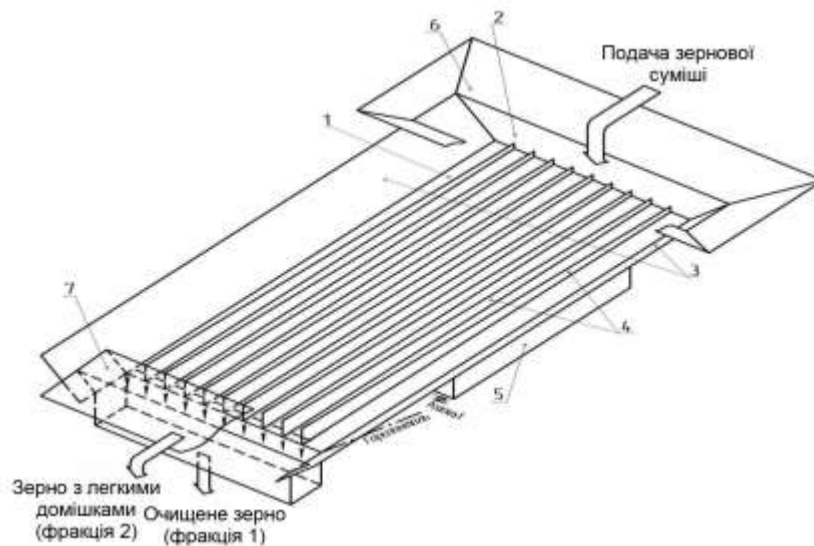


Рис. 3.5. Схема робочого органу: 1- робочий орган; 2-торцева стінка; 3- бічні стінки; 4- рифлі; 5- привід; 6 - живильник; 7- ніж.

Робочий орган здійснює перпендикулярні сходу зернової суміші поворотно-поступальні коливання. Для визначення коливань робочої поверхні використано встановлення, представлене на рис. 3.6, що складається зі станини з встановленими на ній двома горизонтальними рейками 1, робочого каналу, обмеженого вертикальними стінками, з жорстко закріпленою в каналі опорною поверхнею 2. Поворотно-поступальні коливання робочої поверхні забезпечували обертанням ексцентрика 3. Спосіб фіксації ексцентрика на осі за допомогою гвинта дозволяє задавати амплітуду A коливань. Ексцентрик приводиться в рух електродвигуном 6 через клиноремennу передачу 5. Можливість зміни частоти коливань досягається завдяки лобовому варіатору 4.

У нижній сходовій частині робочого органу встановлюється ніж - зернового потоку 7, що дозволяє розділити потік на верхній шар, в якому концентруються практично всі легкі домішки, і нижній шар, який формується з чистого зерна при практично повній відсутності легких домішок.

На рис 3.6 для зручності зображення і розуміння робочий орган з візком і напрямними умовно зображені повернутими на 90 градусів.

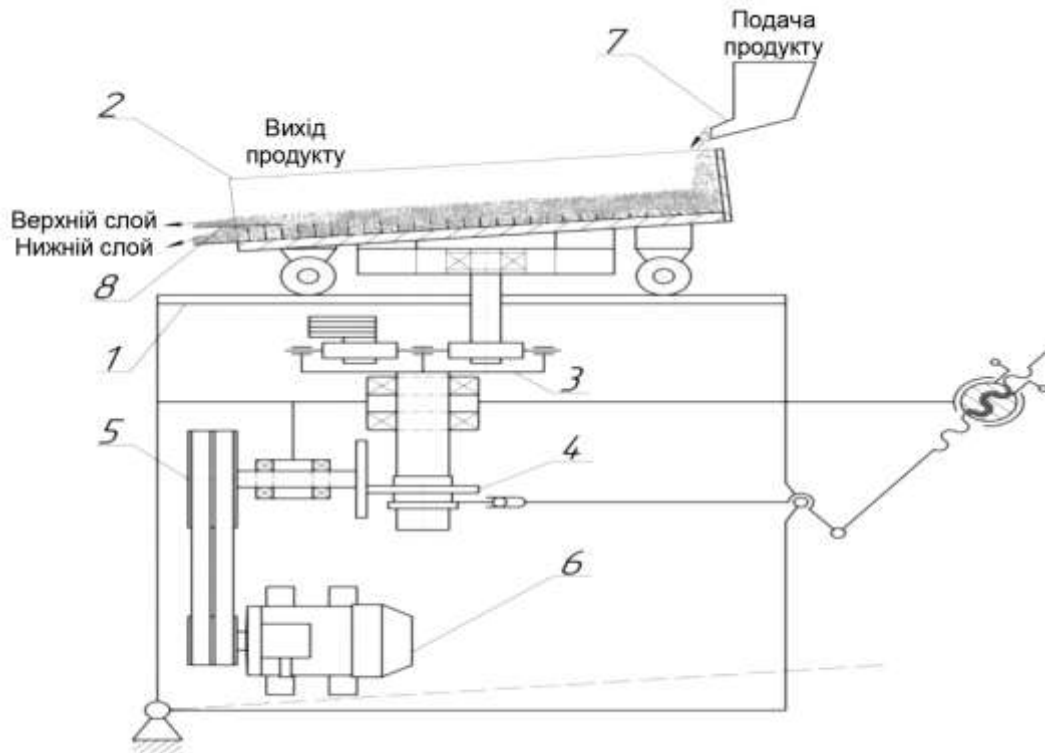


Рис. 3.6. Схема експериментальної установки для створення горизонтальних коливань робочої поверхні: 1 - станина; 2 - канал із закріпленою опорною поверхнею; 3 - ексцентрик; 4 - варіатор; 5 - ремінна передача; 6 - електродвигун; 7 - вібраційний живитель; 8 - ніж.

Встановлення дозволяє варіювати кількість коливань робочого органу в межах від 0 до 500 на хвилину, кут нахилу опорної поверхні від 0 до 10, питоме навантаження на одиницю ширини опорної поверхні від 0 до 2 кг/см*хв.

3.2.2. Методика дослідження

Експериментальна установка для сепарування зернової суміші працює наступним чином. Вихідний продукт живителем подається у верхню частину робочого органу. Привід забезпечує горизонтальні гармонійні коливання робочого органу перпендикулярно лінії найбільшого скату опорної поверхні та рифлям.

Оскільки торцева 2 і бічні 3 стінки (рис. 3.6) мають висоту більшу висоти рифлів 4, на робочій поверхні утворюється шар суміші товщиною, що перевищує висоту рифлів. Під час коливань робочої поверхні вплив рифлів 4 на шар суміші забезпечує її самосортування, що проявляється у спливанні легких частинок у верхній шар зернового потоку. При такій орієнтації рифлів

щодо напрямку коливань поверхні забезпечується висока ефективність процесу самосортування. При русі зернової суміші вниз по похилій поверхні від приймальної частини до сходової, зернова суміш розшаровується. У результаті розшарування легкі домішки спливають у верхні шари зернового потоку. Ніж 8 розрізає зерновий потік на дві частини. Для визначення подальших пояснень прийнята наступна термінологія: Нижня частина зернового потоку, що рухається під ножем, називається першою фракцією - фракція 1. Верхня частина зернового потоку, що рухається над ножем, називається другою фракцією - фракція 2. Фракція 1 складається із зерна, очищеного від легких домішок. Фракція 2 містить зерно, в якому зосереджені практично всі легкі домішки, що містяться у вихідній зерновій суміші.

Частоту коливань опорної поверхні змінювали за допомогою лобового варіатора. Значення частоти коливань при цьому фіксували цифровим фототахометром з точністю до 0,1 кіл/хв. Амплітуду коливань A робочої поверхні визначали за допомогою лінійки з ціною поділу 1 мм.

Амплітуду визначали наступним чином: на станині 1 встановили міліметрову шкалу, а на поздовжній стінці каналу зі 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» позначки шкали, встановленої на рівні осі обертання ексцентрика 3 і відомого шківів варіатора 4.

Досліджено вплив на процес сепарування наступних кінематичних та установчих параметрів: частота коливань робочої поверхні; кут нахилу поверхні до горизонталі; питоме зернове навантаження на робочий орган пристрою.

Частоту коливань робочого органу змінювали від 170 до 230 коливань за хв, кут нахилу опорної поверхні визначали за допомогою оптичного квадранта з точністю 0,1 град.

Експерименти проводили при постійних характеристиках вихідної суміші із засміченістю легкими домішками 0,1%. Така мала концентрація

домішки була обрана з метою проведення процесу в досить «жорстких» умовах.

Продуктивність установки визначали, заміряючи масу переробленої зернової суміші в одиницю часу; питома навантаження на одиницю ширини опорної поверхні в одиницю часу обчислювали за виміреною продуктивністю і відомою шириною опорної поверхні.

Вихід і якість фракцій визначали зняттям кількісно-якісних балансів. Фракції піддавали ручному розбиранню. Масу фракцій і легких домішок у кожній фракції визначали їх зважуванням.

Зважування проводили на електронних вагах з точністю 0,01 г. Експерименти проводили в 5 повторностях при встановленому рух зернового потоку. Обробку результатів проводили наступним чином:

- процентний вміст легких домішок (засміченість) визначали за формулою

$$\eta_{\text{н}} = \frac{m_{\text{л.п.н.}}}{m_{\text{н}}} * 100, \eta_{\text{в}} = \frac{m_{\text{л.п.в.}}}{m_{\text{в}}} * 100, \% \quad (3.2)$$

де $m_{\text{н}}$ і $m_{\text{в}}$ - маса зразків нижнього і верхнього шарів (г), відповідно;
 $m_{\text{л.п.н.}}$ і $m_{\text{л.п.в.}}$ - маса легких домішок в зразках (г), що переміщуються за одиницю часу;

- ефективність сепарування (процентний вміст легких домішок, виділених з нижнього шару, в процентах від початкової засміченості (0,1%))

$$E = \left(1 - \frac{\eta_{\text{н}}}{0,1}\right) * 100, \% ; \quad (3.3)$$

- інтенсивність вилучення легкої домішки з нижнього шару

$$I = \frac{E}{t}, \% / \text{с}, \quad (3.4)$$

де t -час вилучення легкої домішки з зразка;

- масова частка нижнього шару

$$\varepsilon_{\text{н}} = \frac{m_{\text{н}}}{m_{\text{н}} + m_{\text{в}}} * 100, \% . \quad (3.5)$$

3.2.3. Аналіз отриманих результатів

При проведенні досліджень змінювали, як більш значущі параметри:

питоме навантаження зернової суміші, частоту коливань робочого органу, кут нахилу робочого органу до горизонту. Визначали вплив змінних параметрів на кількість виділених з нижнього шару легких домішок.

Розгляньмо вплив зазначених змінних на якісні характеристики процесу вилучення легких домішок з нижнього шару (ефективність та інтенсивність).

Вплив питомого навантаження на робочий орган.

Розглянутий параметр представляє певний інтерес з позицій як кількісних, так і якісних.

Питоме навантаження на робочий орган визначає продуктивність сепаратора, що є однією з основних технічних характеристик машин.

Зростання товщини шару призводить до зростання опору переміщенню легких домішок з нижнього шару у верхній, незважаючи на те, що при вібраційному впливі збільшується порізність шару сипучих матеріалів. Є дані, що в міру видалення межі потоку від верхніх точок рифлів знижується швидкість самосортування [67-70]. При цьому слід мати на увазі, що в нашому випадку вібраційні переміщення опорної поверхні спрямовані паралельно цій поверхні, що не чинить ущільнюючого впливу на потік суміші зерна і легких домішок.

На рис 3.7. представлені залежності ступеня засміченості легкими домішками нижнього (графік 1) і верхнього (графік 2) шарів суміші, ефективності вилучення домішки з нижнього шару (графік 3) та інтенсивності вилучення домішки (графік 4) від питомого навантаження при частоті коливань робочого органу 190 кіл/хв, амплітуді 25 мм.

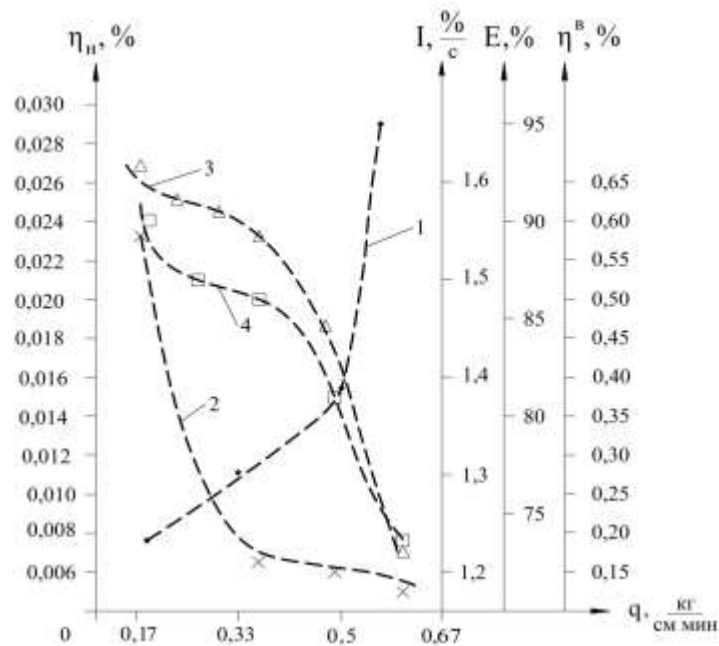


Рис. 3.7. Залежності $\eta_{\text{в}}$ - (1); $\eta_{\text{н}}$ - (2); E- (3); I- (4) від питомого навантаження на робочий орган

Аналіз наведених результатів показує, що в дослідженому діапазоні зміни питомого навантаження відбувається зниження ступеня засміченості нижнього шару і зростання того ж показника верхнього шару. Пряма пропорційність відсутня. Так при питомому навантаженні, рівному 0,6 кг/см.хв було виділено з нижнього шару 72% від наявного в нижньому шарі кількості легких домішок, а при $q = 0,184$ кг/см. хв - 92,55%. При цьому інтенсивність вилучення легких домішок змінилася з 1,22 %/с при $q = 0,6$ кг/см. хв до 1,56 %/с при $q = 0,154$ кг/см. хв, тобто приблизно в 1,28 рази (за 100% прийнято кількість легких домішок у вихідній суміші, що дорівнює 0,1%).

Таким чином, у всьому дослідженому діапазоні зміни q підтверджена висока ефективність процесу вилучення легких домішок з нижнього шару зернового потоку, особливо при малих q , коли витягується до 92% від вихідної кількості легких домішок.

Математична обробка результатів експериментів програмним продуктом Wolfram Mathematica 8 дозволила отримати наступні апроксимуючі функції та емпіричні коефіцієнти.

Вплив частоти коливань робочого органу.

На рис 3.8 показано залежність нижнього шару: засміченості легкими домішками (графік 1), ефективності сепарування (графік 2) та інтенсивності вилучення домішок (графік 3) від частоти коливань робочого органу при

питомому навантаженні 0,193 кг/см.хв, вугіллі нахилу робочого органу 3,5, висоті рифлів 10 мм.

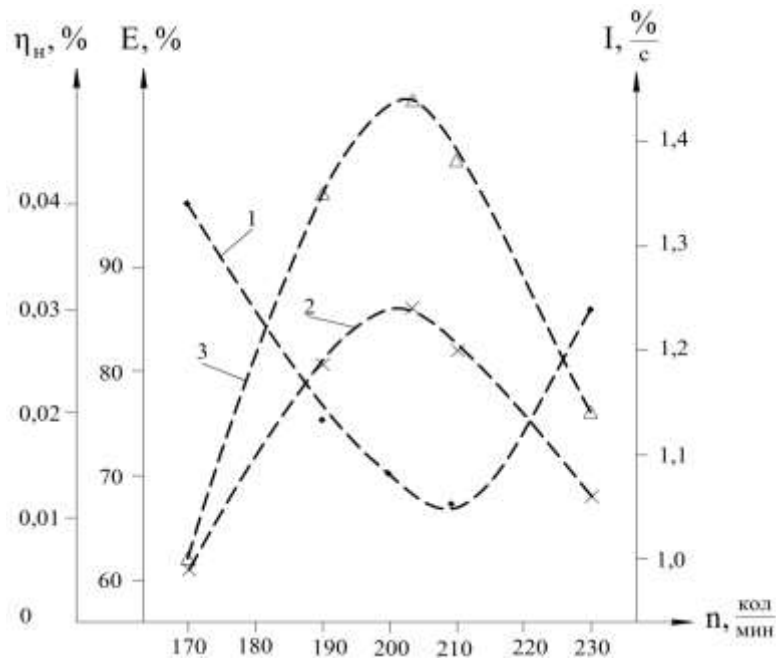


Рис. 3.8. Залежності η_n (1), E (2), I (3) від частоти коливань робочого органу

Як видно, крива засміченості має чіткий мінімум в діапазоні частот 195... 210 кол/хв., що пояснюється наступним чином. Однією зі складових рушійної сили для частинок зернового шару є сила інерції, пропорційна квадрату частоти коливань. Збільшення частоти коливань призводить до різкого зростання рушійної сили і швидкості частинок. При цьому зростає вплив бічних стінок робочого органу і спостерігається виникнення перемішування сипучої суміші, що знижує ефективність післяйового руху і вилучення легких домішок з нижнього шару.

Як видно з графіків, при збільшенні частоти коливань від 190 до 200 кол/хв ефективність та інтенсивність вилучення зростає в 1,4 рази. Подальше збільшення частоти коливань призводить до зменшення параметрів E та I .

Таким чином, існує певний діапазон частот робочого органу (від 190 до 210 кол/хв), який може бути рекомендований як найбільш доцільний з позиції ефективності процесу, що вивчається.

Математична обробка результатів експериментів програмним продуктом Wolfram Mathematica 8 дозволила отримати наступні апроксимуючі функції та емпіричні коефіцієнти.

Вплив кута нахилу робочої поверхні.

На рис 3.9 показано вплив кута нахилу опорної поверхні робочого органу до горизонту на засміченість нижнього шару, ефективність та інтенсивність вилучення домішки при зміні питомого навантаження і постійної $n = 200$ кол/хв. Як і слід було очікувати, зі збільшенням кута змінюється засміченість нижнього шару, зростає ефективність та інтенсивність вилучення легких домішок. Вплив кута нахилу пояснюється зміною проекції сили тяжкості частинок нижнього шару на опорну поверхню робочого органу, що призводить до зміни швидкості руху частинок і часу перебування частинок у зоні вібраційного впливу.

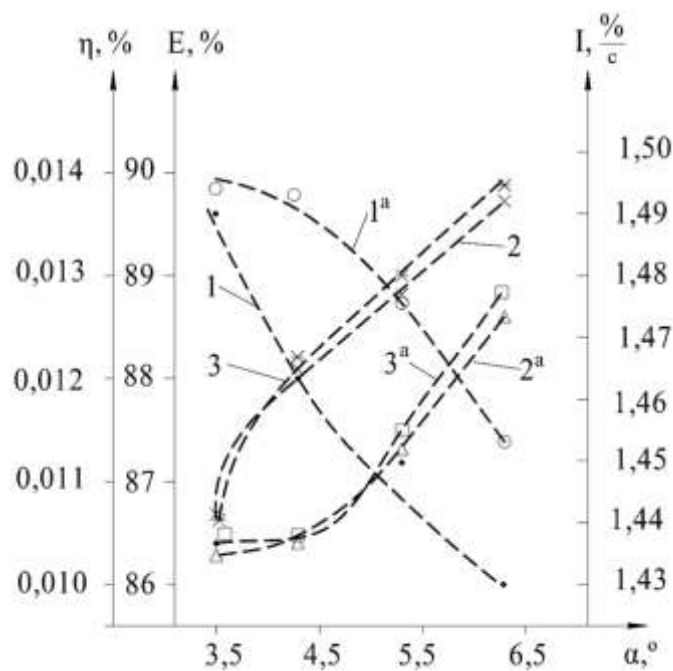


Рис. 3.9. Залежності η , E , I від кута нахилу опорної поверхні робочого органу при зміні питомого навантаження: η - (1, 1^а); E - (2, 2^а); I - (3, 3^а); 1, 2, 3 - при $q = 0.2$ кг/см мін; 1^а, 2^а, 3^а - при $q = 0.27$ кг/см хв

При зміні кута від $3,5^\circ$ до $6,3^\circ$ засміченість нижнього шару легкими домішками зменшилася приблизно в 1,3 рази, ефективність та інтенсивність процесу збільшилися в 1,3 разів. При питомому навантаженні q , рівною $0,266$ кг/см мін зміна кута від $3,5^\circ$ до $4,3^\circ$ практично не мала впливу на якісні показники.

Математична обробка результатів експериментів програмним продуктом Wolfram Mathematica 8 дозволила отримати наступні апроксимуючі функції та емпіричні коефіцієнти.

Залежність масової частки нижнього шару

Крім розглянутих залежностей якісних характеристик процесу (E , I) має безсумнівний практичний інтерес дослідження впливу тих же змінних параметрів на масову частку нижнього шару в загальному потоці сипучої суміші.

При наявності вібрації за рахунок відносного руху частинок потоку відбувається збільшення порізності, зменшення щільності рухомого потоку. Оскільки нижня межа шару не може збільшувати товщину шару вгору. Зміна потоку залежить від декількох змінних параметрів. Зміна стану потоку може характеризуватися величиною масової частки нижнього шару в загальному потоці зернової суміші.

На рис. 3.10 показано залежність масової частки нижнього шару від частоти коливання n , кута нахилу робочої поверхні α та питомого навантаження q .

Залежність від частоти коливань - графік 1 (при постійних $q = 0,193$ кг/см мін; $\alpha = 3,5$ градуса) є лінійною з кутом нахилу до осі абсцис. При зазначених параметрах кут нахилу графіка характеризує інтенсивність впливу параметра n . При збільшенні n від 170 до 230 кол/хв масова частка збільшується в 3,25 рази, можливо, за рахунок зменшення коефіцієнта опору руху частинок і зростання середньої швидкості руху нижнього шару. При цьому товщина нижнього шару в експерименті залишається постійною, а товщина верхнього шару зменшується.

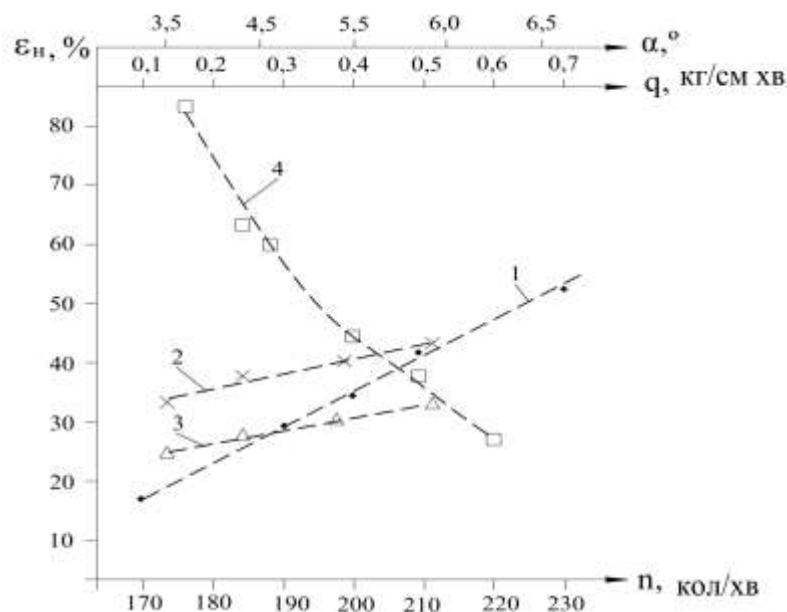


Рис. 3.10. Залежності масової частки нижнього шару від змінних параметрів.

Зі збільшенням кута нахилу робочої поверхні від $3,5^{\circ}$ до $6,3^{\circ}$ масова частка зростає з однаковою інтенсивністю (графіки 2 і 3 практично паралельні) приблизно в 1,3 рази.

Збільшення питомого навантаження на робочий орган зрушує розглянуту залежність у бік менших значень масової частки.

Графік 4 - залежність масової частки нижнього шару від питомого навантаження (при $\alpha = 3,5$, $n = 190$ кол/хв). Зі збільшенням q зростають товщина зернового потоку, сила опору руху частинок (сила тертя), зменшуються рушійна сила, середня швидкість переміщення частинок шару і масова частка. Так при збільшенні q від 0,16 до 0,6 кг/см мін, тобто в 3,7 рази, масова частка зменшується з 83 до 26 відсотків, майже в 3,2 рази.

Крім висновків щодо конкретних залежностей, наведених у тексті, слід зазначити наступне: емпірично підтверджується ефективна працездатність моделі, запропонованої нами в; отримані значення інтенсивності вилучення легких домішок дозволяють визначити час перебування зерна на робочому органі, необхідний для видалення заданої кількості легких домішок.

3.3. Дослідження руху частинок верхнього шару

Метою є дослідження руху частинок верхнього шару, розташованого над рифлями робочої поверхні, відносно нижнього шару, що складається з частинок зернової суміші, заповнюють простір між рифлями, що робить коливання разом з робочою поверхнею.

При дослідженні вібраційного переміщення шарів сипучого матеріалу застосовують різні модельні частинки: фарбовані (мічені) зернівки; гуртки щільного паперу (індикатори), оклеєні зернівками або домішками досліджуваної зернової суміші. У наших дослідженнях використовували індикатор, який являє собою пластмасовий гурток, оклеєний зернівками пшениці з закріпленням на ньому пишучим елементом фломастера.

Дослідження проведено з метою визначення траєкторії частинки, розташованої під шаром зерна, при її русі відносно коливається робочої

поверхні. Складністю розглянутого завдання є такі умови: похила поверхня здійснює горизонтальні гармонійні коливання перпендикулярно лінії найбільшого ската; частинка здійснює рух відносно поверхні під дією двох взаємно перпендикулярних сил: переносної сили інерції та складової сили тяжкості частинки, спрямованої вниз уздовж лінії найбільшого скату; реєстрація траєкторії частинки, що знаходиться під шаром зернової суміші в контакті з робочою поверхнею.

Реєстрацію траєкторії індикатора при його русі щодо робочої поверхні здійснювали наступним чином. Рифлі робочої поверхні замінили гладким аркушем щільного паперу. Очевидно, що умови руху індикатора відносно робочої поверхні відрізняються від умов руху частинок верхнього шару відносно нижнього, що складається з частинок зернової суміші, що заповнюють простір між рифлями, і робить коливання разом з робочою поверхнею, тільки коефіцієнтом тертя. Ця обставина може бути легко врахована.

На рис. 3.11 - 3.13 представлені ділянки траєкторії частинки верхнього шару при різних значеннях частоти коливань n і фіксованих значеннях амплітуди $A = 0,025$ м горизонтальних коливань поверхні і кута її нахилу $\alpha = 3,50$ до горизонталі. На малюнках суцільною лінією показані траєкторії, побудовані за результатами розрахунків методикою, представленою в главі 2, точками відзначені окремі положення частинки.

Розрахунок траєкторії частинки виконували в наступній послідовності.

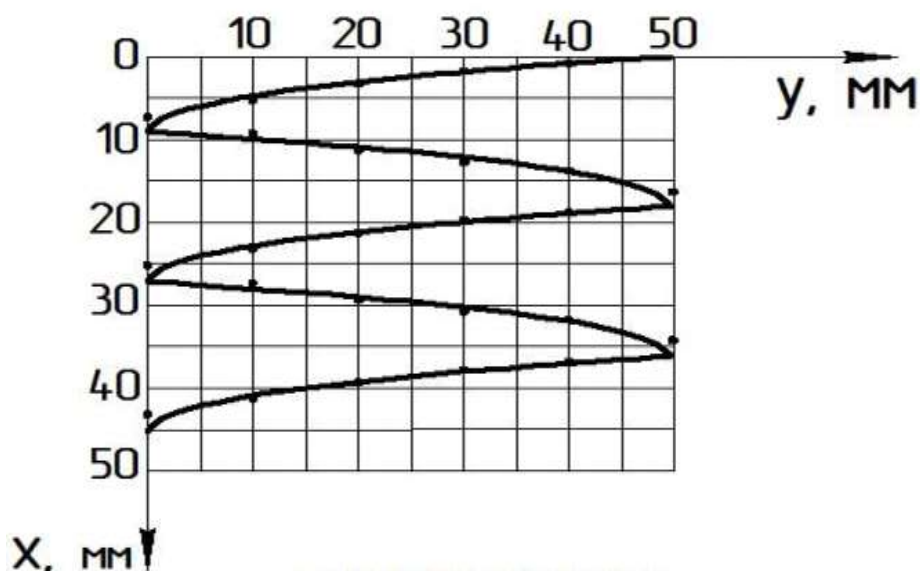


Рис. 3.11. Траєкторія частинки верхнього шару, точки (експериментальна), лінія (розрахункова). При $A=0,025$ м, $a=3,5^\circ$, $n= 200$ КОЛ/ХВ

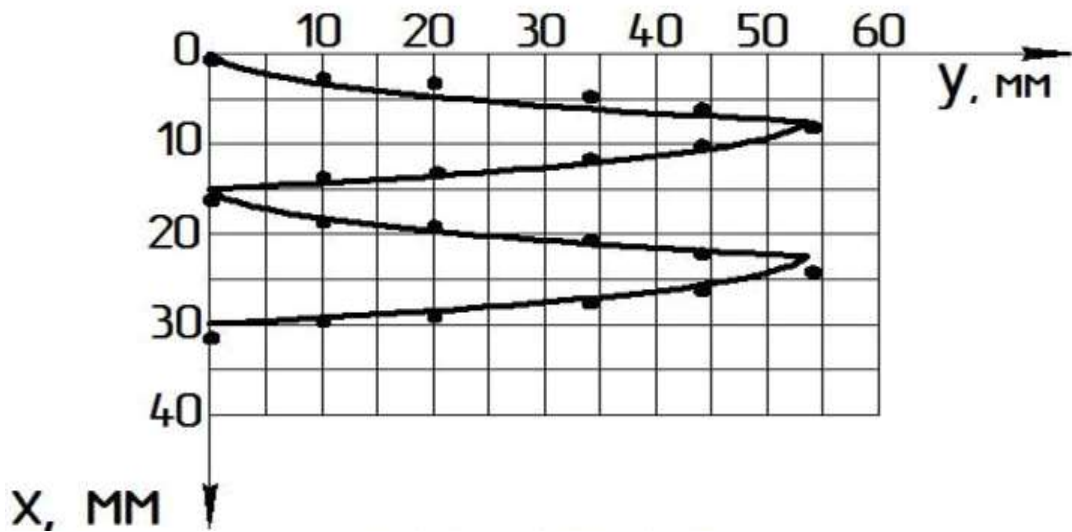


Рис. 3.12. Траєкторія частинки верхнього шару, точки (експериментальна), лінія (розрахункова). При $A=0,025$ м, $a=3,5^\circ$, $n= 250$ кол/хв

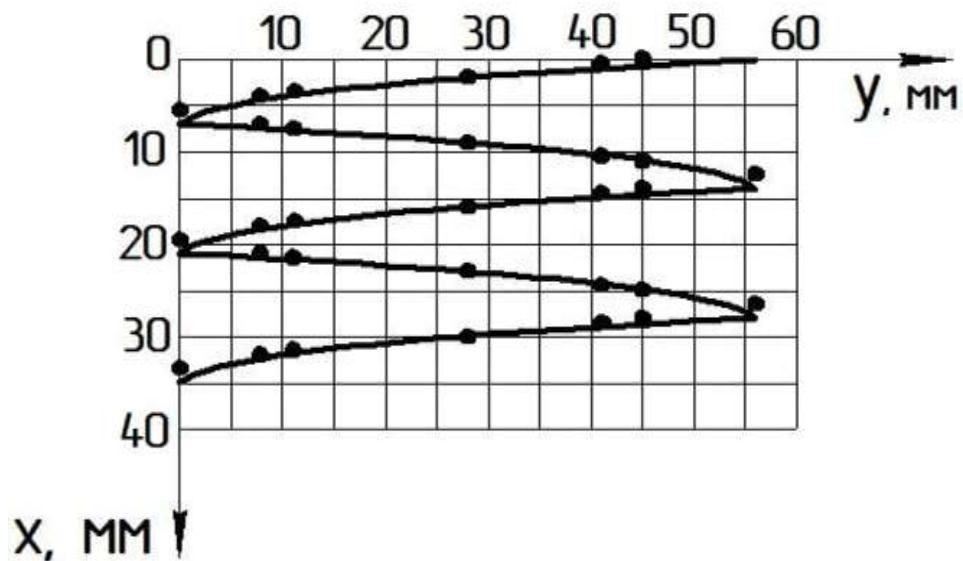


Рис. 3.13. Траєкторія частинки верхнього шару, точки (експериментальна), лінія (розрахункова). При $A=0,025$ м, $a=3,5^\circ$, $n= 300$ КОЛ/ХВ

При заданих кінематичних та установочних параметрах коливань робочої поверхні визначали режим відносного руху частинки. За рівнянням, що відповідає даному режиму, визначали значення фазових кутів початку та

закінчення відносного ковзання частинки на кожному етапі її руху. Зауважимо, що етапи ковзання частинки відрізняються напрямком її ковзання по осі y . На першому етапі ковзання частинка рухається в позитивному напрямку, як уздовж осі y , так і вздовж осі x . На другому етапі ковзання частинка здійснює рух в негативному напрямку осі y і в позитивному напрямку осі x . Розраховували координати частинки в переносній системі координат на кожному етапі її ковзання з кроком зміни фазового кута коливань робочої поверхні, рівним $0,1$ радіан.

З аналізу отриманих результатів можна зробити такі висновки:

- частинка здійснює коливальний рух відносно прямої, паралельної лінії найбільшого скату поверхні з одночасним рухом уздовж лінії найбільшого скочування;

- зі збільшенням частоти коливань n робочої поверхні в діапазоні досліджених значень частоти (від 200 до 300 кол/хв) спостерігається незначне зростання амплітуди коливань частинки: при збільшенні частоти коливань поверхні від 200 об/хв до 300 об/хв амплітуда коливань частинки збільшується з $0,025$ м до $0,028$ м;

- зі збільшенням частоти коливань поверхні в тому ж діапазоні переміщення частинки по осі x зменшується з 18 мм до 14 мм за період коливань робочої поверхні;

- рух частинки верхнього шару можна розглядати як складний, що складається з рухів у двох взаємно перпендикулярних напрямках: «швидкий» коливальний рух відносно прямої паралельної лінії найбільшого ската і «повільний» еволюційний рух уздовж лінії найбільшого ската поверхні.

Перевірка, проведена за F -критерієм Фішера, показала, що запропонована динамічна модель адекватно описує реальний процес вібраційного переміщення верхнього шару зерносмісі відносно похилої робочої поверхні, що здійснює горизонтальні гармонійні коливання в напрямку, перпендикулярному лінії найбільшого скату поверхні.

3.4. Середня швидкість руху частинок нижнього шару

Основним завданням експериментів даного розділу було підтвердження

адекватності аналітичних залежностей, отриманих у розділі 2.3. Було використано установку, описану в розділі 3.2. Дослідження проводили за наступною методикою. При встановленому режимі процесу руху зернового потоку з легкими домішками пофарбовану зернівку поміщали в нижній шар між рифлями в певну фіксовану точку і заміряли час початку досвіду. Через заміряний проміжок часу зафіксували положення міченої частинки і заміряли шлях S пройдений часткою за час. Середню швидкість частинки між рифлями визначали, як співвідношення S (м) до часу. Експеримент проводили при зміні частоти коливань робочого органу від 200 до 250 кол/хв. Інші параметри залишалися постійними.

На рис. 3.14 представлені результати аналітичних і експериментальних визначень середньої швидкості частинки нижнього шару залежно від частоти коливань рифленої робочої поверхні. Аналіз результатів показав, що зміни n від 200 до 250 кол/хв призводить до збільшення середньої швидкості нижнього шару в 1,7 рази.

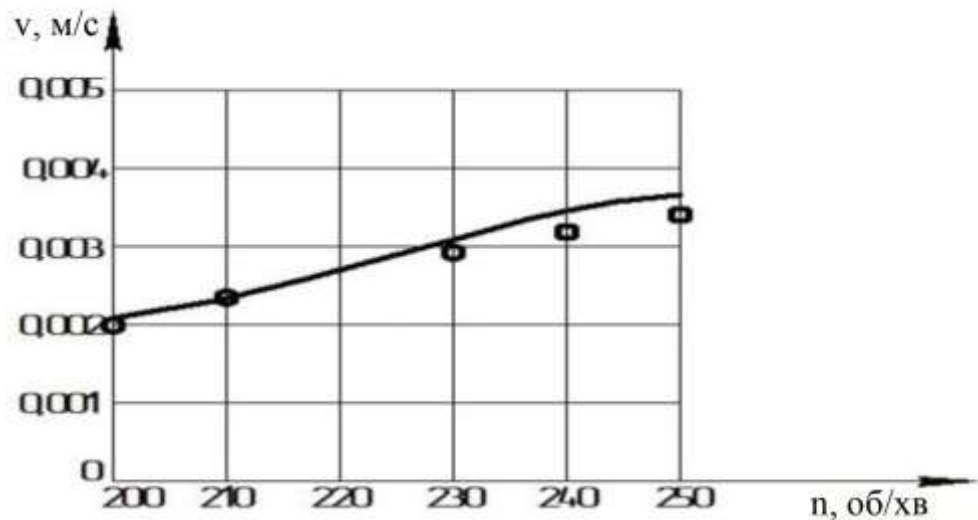


Рис. 3.14. Швидкість руху частинки нижнього шару

Перевірка, проведена за критерієм F - Фішера, підтвердила, що запропонована математична модель адекватно описує реальний процес переміщення частинки нижнього шару між рифлями.

РОЗДІЛ 4. ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ

4.1. Видалення легких домішок

У запропонованій на рис. 4.1. схемі використана двошарова модель течії сипучого потоку з накладенням на похилий робочий орган вібраційного впливу, спрямованого перпендикулярно Ріфлі і руху нижнього шару [64]. Така схема приведена в розділі 2 при теоретичному дослідженні течії верхнього і нижнього шарів зернової суміші, так само використана в установці, застосованій в експериментальних дослідженнях (розділ 3) для вивчення залежностей ефективності процесу виділення легких домішок з нижнього шару в верхній.

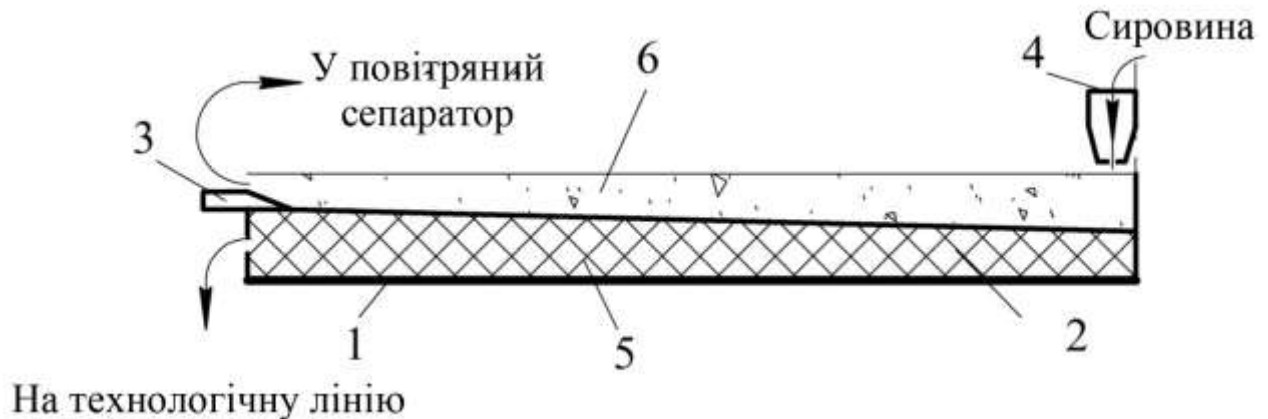


Рис. 4.1. Схема виділення легких домішок:

1 - опорна поверхня; 2 - рифлі; 3 - ніж; 4 - живильник; 5 - нижній шар; 6 - верхній шар.

При роботі описуваної установки верхній і нижній шари розділяються встановленим на робочому органі ножем. Власне ніж пересувається перпендикулярно опорній поверхні у двох напрямках за допомогою двогвинтового механізму з фіксаторами положення ножа для усунення можливості зміни положення при впливі вібрації.

На напрямних закріплені лінійні шкали для точної установки ножа і розмірів перетину для протікання нижнього шару. Ніж може бути встановлений як безпосередньо на рифлі, так і над ними на деякій відстані.

Доцільне положення ножа залежить, в основному, від засміченості вихідної сировини і змінних параметрів процесу сепарування. Тому перевірку

правильності встановлення ножа слід проводити при кожній зміні партії зернової сировини. Для цього необхідно відібрати зразок знову отриманої партії, в лабораторії розібрати зразок на фракції. Знаючи масу легких домішок і масу взятого зразка, легко визначити вихідну засміченість. Знаючи продуктивність пристрою, насипну щільність зернової суміші, масу домішок, що підлягають видаленню, можна визначити масову частку нижнього шару і висоту положення ножа.

4.2. Видалення легких та важких домішок

Схема пристрою, представленого на рис 4.2, на відміну від попередньої схеми (рис. 4.1), де опорна поверхня з рифлями була виконана з суцільного листа, що не мав отворів, опорна поверхня виготовлена з двох частин. Перша - суцільна, довжина якої достатня для переходу легких домішок з нижнього шару (що проходить під ножем) у верхній (над ножем). Друга частина виконана з сита, що дозволяє відсіювати дрібні, важкі частинки з нижнього шару, які провалюються на суцільний піддон під пристроєм. Складність при роботі описаного пристрою полягає у виборі режимів вібрації, що дозволяють раціонально витягувати одночасно легкі домішки (максимально) і дрібні важкі (частково).

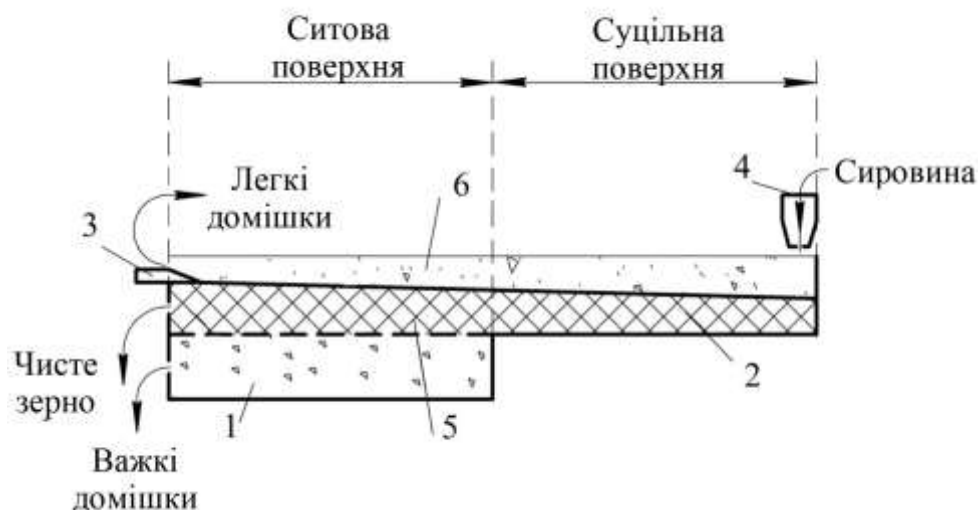


Рис. 4.2. Схема видалення легких і важких домішок:

- 1 - піддон; 2 - рифлі; 3 - ніж; 4 - харчувальник; 5 - нижній шар; 6 - верхній шар.

4.3. Суміщення процесів сепарування та транспортування

Пропонований пристрій віброживильника дозволяє використовувати вібропривод сепаруючого пристрою для переміщення зерна, відходів і продуктів переробки зерна.

Така ситуація виникає при проектуванні технологічних ліній і ділянок переробки зерна.

На ділянці сепарування (рис. 4.3) здійснюється технологічна операція з виділення легких домішок з нижнього шару та переведення їх у верхній шар. При цьому вібраційний вплив, як показано на рис. 4.3, спрямований перпендикулярно рифлям на робочому органі. Далі очищене зерно або домішки надходять на ділянку транспортування, де вібраційний вплив направлено вздовж робочого органу. При такій схемі продукт не може стопоритися, оскільки швидкість продуктів на ділянці транспортування більша, ніж на ділянці сепарування. Рифлі на ділянці повороту доцільно мати для забезпечення рівномірності товщини шару продукту під дією відцентрових сил.

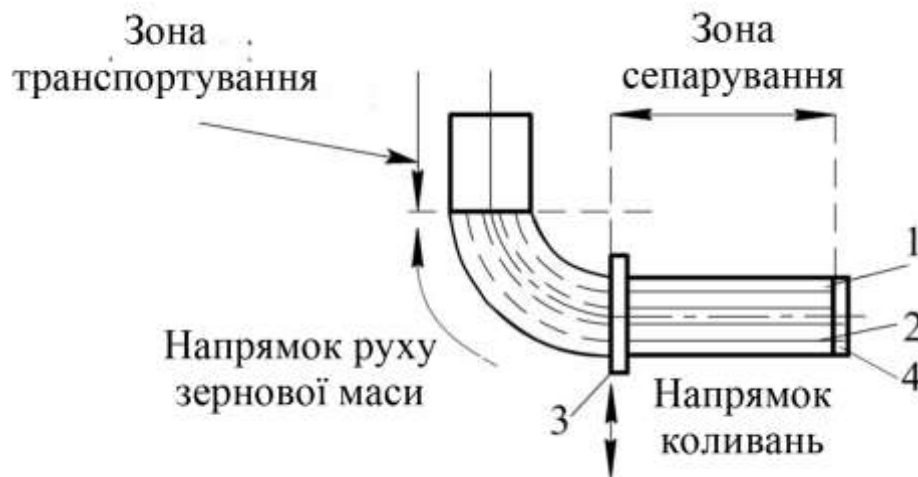


Рис. 4.3. Схема суміщення процесів сепарування і транспортування (вид зверху): 1 - опорна поверхня; 2 - рифлі; 3 - ніж; 4 - живитель

ВИСНОВКИ

Розроблено динамічну модель пошарового безвідривного руху суміші зерна пшениці і легких домішок на похилій робочій поверхні з рифлями при її гармонійних коливаннях, спрямованих перпендикулярно Ріфлі.

Теоретично доведено можливість реалізації в запропонованій моделі течії шарів зернового потоку з максимальною різницею швидкостей для забезпечення стабільного процесу самосортування.

Проведено аналіз отриманих аналітичних залежностей з метою виявлення впливу змінних параметрів процесу сепарування на траєкторію частинок верхнього шару сипучої суміші.

Визначено напрямки інтенсифікації процесу сепарації.

Адекватність розроблених теоретичних положень підтверджена експериментальними дослідженнями.

Запропоновано та обґрунтовано динамічна модель пошарового безвідривного руху сипучого тіла при прямолінійних гармонійних коливаннях похилій рифленої поверхні перпендикулярно лінії найбільшого скату.

Розроблено модель двуслойного вібраційного переміщення зернового потоку по поверхні з рифлями у вигляді прямокутних пластин при їх розташуванні перпендикулярно напрямку коливань.

Теоретично обґрунтовано та доведено можливість транспортування частинок нижнього шару між рифлями під дією складової сили тяжіння вздовж лінії найбільшого скату.

Експериментально визначені коефіцієнти опору зрушенню шарів зерна пшениці по рифленої поверхні вздовж напрямку руху.

Науково обґрунтований і практично реалізований спосіб очищення зерна від легких домішок, що полягає в тому, що при вібраційному русі по рифленої поверхні з вихідної зернової суміші витягають зазначені домішки з ефективністю очищення, що перевищує ефективність очищення зерна від легких домішок в повітряних сепараторах.

Експериментально визначено залежності ефективності процесу сепарування і інтенсивності виділення легких домішок з нижнього шару від питомого навантаження, частоти коливання і кута нахилу робочого органу.

Розроблено оригінальну конструкцію робочого органу Вібросепаратор, що дозволяє забезпечити ефективність вилучення легких домішок із зерна пшениці понад 80% і істотно знизити навантаження на пневмоканал.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V. M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, №1. P. 95-104.
2. Aliev Elchin, Pryshliak Viktor, Yaropud Vitaly Research of physical and mechanical properties of oil seed crops. MOTROL: mmission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2017. Vol. 19., № 3. P. 103-108.
3. Pirchio M., Fontanelli M., Frasconi CE Autonomous Mower vs. Rotary Mower: Effects on Turf Quality and Weed Control in Tall Fescue Lawn. Agronomy. 2018. Vol. 8, Is. 2. P. 15-24.
4. Zastempowski M., Bochat A. Modeling of cutting process by the shear-finger cutting block. Applied engineering in agriculture. 2014. Vol. 30, Is. 3, P. 347-353.
5. Агулов І. І., Вознюк Л. Ф., Левчій О. В. Довідник по технічному обслуговуванню сільськогосподарських машин. Київ : Урожай, 1989. 252 с.
6. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №2. С. 19-23.
7. Аникеев А.И. Цыганенко М.А., Сыровицкий К.Г., Коваль А.Р. К вопросу повышения эффективной процесса уборки урожая путем внедрения элементов агрологистики. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol. 18, № 7. Polish Academy of Sciences. 2016. С.49 - 54.
8. Анікеєв О.І., Сыровицький К.Г., Агапов М.О., Бойко А.О. Методика обґрунтування раціонального складу і швидкісного режиму роботи машинних агрегатів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. № 18 (2019), 62-69.
9. Бакум М. В., Нікітін С. П., Сергєєва А. В. Проектування сільськогосподарських машин : навч. посіб. Харків : Харк. держ. техн. ун-т с.-г., 2003. 336 с.
10. Веселовська Н.Р., Малаков О.І., Бурлака С.А. Математичне моделювання механізму вивішування косарки-плющилки причіпної КПП-4.2. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. №4. С. 5-10.

Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2010. №4. С. 24-29.

11. Вірник М.М., Солона О.В. Алгоритми кінематичного і силового аналізу важільних механізмів з гідроприводом. Збірник наукових праць

12. Войтюк Д. Г., Булгаков В. М., Кропивко С. В., Онищенко В. Б. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підруч. для студ. вузів. Київ : Друк, 2005. 464 ^

13. Войтюк Д. Г., Яцун С. С., Довжик М. Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посіб. Суми : Унів. кн., 2008. 543 с.

14. Войтюк Д.Г., Іщенко Т.Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник. За ред. Д.Г.Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.

15. Гунько І.В., Браніцький Ю.Ю., Токарчук О.А. Засоби механізації процесу збирання та подрібнення біоенергетичних культур. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №2. С. 129-134.

16. Гунько І.В., Коваль Л.Г. Енергоощадні безконтактні методи діагностування показників технічного стану мобільної сільськогосподарської техніки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №3. С. 89-93.

17. Дринча В.М., Суконин Л.М. Технология и комплекс машин для очистки зерна и семян. Земледелие. 1997. №3. С. 34-35.

18. ДСТУ 46.012-2000. Техніка сільськогосподарська. Методи економічної оцінки техніки. [Чинний від 2001.02.01]. К. : Мінагрополітики України, 2000. - III, 18 с. - (Галузевий стандарт України).

19. Дудак С.М., Грицака О.М., А.В. Спирін Кінетика процесу вимолоту зерна зернозбиральними комбайнами. Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки. 2015. №1, Т.1. С. 53-56.

20. Зюлин А. Н., Чижиков А.Г. Перспективы механизации послеуборочной обработки и хранения семян. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2002. №6. С.10-14.

21. Іскович-Лотоцький Р.Д., Зелінська О.В., Н.Р. Веселовська,

Веселовський Я.П. Оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу з використанням системного підходу. Техніка енергетика транспорт АПК. 2017. №2. С. 109-114

22. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є., Солоня О.В., Цуркан О.В. Технічна механіка. Підручник. Київ : «Хай-Тек-Прес», 2011. 340 с.

23. Калетнік Г.М., Скорук О.П., Токарчук Д.М. Інженерний менеджмент. Методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів факультету механізації сільського господарства спеціальності 8.091902 «Механізація 79 сільського господарства» форма навчання денна і заочна. Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2009. 68 с.

24. Кінницький Я.Т., Харжевський В. О., Марченко М. В. Теорія механізмів і машин в системі MathCAD: навчальний посібник. Хмельницький : РВЦ ХНУ, 2014. 324 с.

25. Ковбаса В.П., Солоня О.В., Спірін А.В., Цуркан О.В. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. №1, Т.1. С. 44-49.

26. Котов Б.І., Спірін А.В., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайну. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №1. С. 26-29.

27. Кравець І.А., Щепетов В.В, Максимов С.Л., Гладкий Я.Н. Энергетика безсервисных систем. Проблемы трибологии. 2002. №2. С. 12-14.

28. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. №4. С. 91-100.

29. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №3. С. 44-52.

30. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. № 2. С.80-87.

31. Лауш П.В., Василенко І.Ф., Лесюк Т.П. та ін. Технічне обслуговування та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник в 2-х ч. За редакцією П.В.Лауша та І.Ф.Василенка. Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс, 2007.

32. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: [підручник для студентів технічних спец. вузів] К.: Знання-Пресс, 2003. 511с.

33.Машины для предварительной очистки зерна [Электронный ресурс] БІ^://1екли.01^ЛЗ-18378.html

34.Мельинвест, ОАО группа компаний [Электронный ресурс]. - Электрон. дан. - Нижний Новгород, 2013. - Режим доступа: http://www.melmvest.ra^atalog/zemoocBistitelnoe_obomdovашe

35. Мельник В.И., Анисеев А.И., Цыганенко М.А., Сыровицкий К.Г. Экономическая эффективность элементов системы точного земледелия. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 17, No. 7, 2001. с. 61-66.

36. Мельник В.І., Романащенко О.А., Анисеев О.І., Фесенко Г.В. Удосконалення роторного розкидача органічних добрив. Інженерія природокористування, № 2 (10), 2018. с. 59-62.

37.Московский М.Н., Бойко А.А. Оценка семенных схем очистки зерноочистительного агрегата в многоотраслевом производстве. Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]: электрон. науч.- инновац. журн. - 2013. - № 2. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1599>

38. Музичук В. І., Анісімов В. Ф. Організація робіт підприємств технічного обслуговування: навчальний посібник. Вінниця: ФОП Рогальська І.О., 2012. 240 с.

39. Музичук В. І., Нахайчук О. В., Комаха В. П. Визначення змісту і об'єму робіт при технічному сервісі. Зб. наук. пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки. Вінниця: ВНАУ, 2012. Вип. 11(65). С. 242–247.

40.Надикто В.Т., Крижачківський М.Л., Кюрчев В.М., Абдула С.Л. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві: навчальний посібник. – Мелітополь, 2005. – 337 с., іл.

41.Павленко В.С., Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Полєвода Ю.А.

З'єднання в машинобудуванні: навч. посібник. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 2015. 110 с.

42. Павленко В.С., Цуркан О.В., Кравченко І.Є., Любін М.В. Пасові передачі. Теорія, розрахунки, конструювання : навчальний посібник. Київ : «Хай-Тек Прес», 2011. 140 с.

43. Панченко А.І., Волошина А.А. Сучасні трактори сільськогосподарського призначення. Трактори країн СНД: посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. 176 с.

44. Патент №120020, МПК В07В 4/02. Пневматический сепаратор для сипкого матеріалу. №а2012116693/03; заявл.: 24.04.2012; опуб. 10.09.2012. Бюл. № 25. С. 3.

45. Патент №135944, МПК В07В 4/00. Пристрій для розподілу сипких матеріалів на фракції. №и2013131485/03; заявл. 9.07.2013; опуб. 27.12.2013. Бюл. №36. С. 3.

46. Патент №146703, МПК А0[^] 12/00. Агрегат для очистки насіння. №и2014119451/13; заявл. 14.05.2014; опуб. 20.10.2014. Бюл. №29. С. 3.

47. Патент №165721, МПК А01F 7/00. Самопересувний агрегат для обмолоту та пневмосепарації зернового вороху. №[^]016115197/13; заявл. 20.04.2016; опуб. 10.11.2016. Бюл. №31. С. 3.

48. Погорілець О.М., Волянський М.С. Гідропривод, Войтюк В.Д., Пастушенко С.І. сільськогосподарської техніки. Навчальне видання. за ред. Погорільця О.М. К.: Вища освіта, 2004. 368 с.

49. Пришляк В. М., Ковальчук О. В. Сільськогосподарські машини: метод. вказівки для виконання лаб. робіт студ. фак. механізації с.-г. Вінниця : ВДАУ, 2005. 44 ^

50. Рубльов В.І., Войтюк В.Д. Управління якістю технічного сервісу і сільськогосподарської техніки при постачанні: посібник. 2-е видання доп.К.: Видав НАУ, 2006. 236 с.

51. Рудницький Б.О., Антонів СФ., Запрута О.А. Особливості технології вирощування насіння нових та перспективних сортів бобових трав в умовах Лісостепу України. Сільське господарство та лісівництво. 2017. Вип. №7, Т. 2. С. 70-76.

52. Серета Л.П. Перспективи і напрямки розвитку сучасного механізованого сільськогосподарського виробництва (Частина I «Сучасні напрямки розвитку технологій в рослинництві»): Методичні вказівки по вивченню дисципліни та виконанню практичних робіт, Вінниця РВВ ВНАУ, 2020. 128 с.

53. Сивак І.О., Деревенько І.А., Островський А.Й. Практикум з механіки матеріалів і конструкцій : навчальний посібник.. Вінниця : ВНАУ, 2011. 144 с.

54. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки. Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. 200 с.

55. Сидорчук О. В., Котенко С. С., Василенко М. О., Кучерявий В. М. Проблеми технічного сервісу сільськогосподарської техніки. Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Т.2. Глеваха, 2014. Випуск 99. С. 299-307.

56. Солоня О. В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування : Навчальний посібник. Вінниця : ВНАУ, 2019. 249 с.

57. Солоня О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №3. С. 105-116

58. Солоня О.В., Купчук І.М. Практикум з Теорії механізмів і машин : навчальний посібник. Вінниця : Друк, 2020. 250 с.

59. Солоня О.В., Купчук І.М. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання практичних робіт. Вінниця : ВНАУ, 2017. 116 с.

60. Солоня О.В., Купчук І.М., Паламарчук В.І. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання курсового проекту. Вінниця : ВНАУ, 2017. 84 с.

61. Спірін А.В., Котов Б.І., Зозуляк О.В. Моделювання та ідентифікація процесу сепарації дрібного вороху вібраційно-повітряними очистками зернозбирального комбайну. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №4. С. 42-45.

62. Тарасенко А.П. Влияние схемы размещения решет в решетном стане на фракционирование зернового вороха. Техника в сельском хозяйстве. 2006. №3. С. 32-34.

63. Тарасенко А.П. Фракционирование зернового вороха на решетках.

Сельскохозяйственные машины и технологии. 2012. №5. С. 26-29.

64. Твердохліб І.В. Дослідження процесу витирання насіннєвого вороху люцерни. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №4. С. 77-83.

65. Тіщенко Л.М., Мельник В.І., Харченко С.О. Каталог сільськогосподарської техніки. Навчальний посібник. Харків: ХНТУСГ, 2015. 450 с.

66. Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. №3. С. 109-119.

67. Хамуев В.Г., Гуляев А.А., Бойко А.А. Justification of She design of pumatic sorting machin for preparation of selection seeds MATEC Web Conferences.- 2018. - Vol. 224. - Номер статті 05010. - (International Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), Sevastopol, Russia, September 10-14, 2018)/-URL: https://www.mateconferences.org/artides/mateconf/pdf/2018/83/mateconf_icmtmte2018_05010.pdf

68. Цуркан О.В. Павленко В.С., Полевода Ю.А. Розрахунки передач привода: Методичні вказівки до виконання курсового проекту з навчальної дисципліни «Деталі машин». Вінниця : РВВ ВНАУ, 2011. 87 с.

69. Черновол М.І., Булей І.А., Кропівний В.М., Технологічні планування підприємств і їхніх підрозділів з ремонту та технологічного обслуговування тракторів. Автомобілів і іншої сільськогосподарської техніки. Альбом: Навчальний посібник – Кіровоград: Кіровоградський державний технічний університет, 1999. 175с.

70. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 648 с. Дринча В.М., Зубаилов И.Г. Качество зернового материала и эффективность послеуборочной обработки. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 9. С.31-34.

ДОДАТОК А

Програма побудови траєкторії та визначення середньої швидкості V_{CP} транспортування частинок верхнього шару вздовж робочої поверхні

Cls

$g = 9.81$

$pi = 3.141592654$

$a1 = 0.025$

$n = 300$

$l1 = 3.5$

$f = 0.3$

$l2 = (l1 * pi) / 180$

$w = (pi * n) / 30$

$a2 = a1 * w ^ 2$

$u1 = \text{Atn}(\text{Sin}(l2) / \text{Sqr}((f * \text{Cos}(l2)) ^ 2 - (\text{Sin}(l2)) ^ 2))$

$u2 = \text{Atn}((g * \text{Sin}(l2)) / a2)$

$u3 = (u1 + u2) / 2$

$z1 = (g * f * \text{Cos}(l2) * \text{Cos}(u3)) / a2$

$z2 = -z1$

Print "A="; a1; "n="; n; "w="; w; "Aw^2="; a2

Print "z+="; z1

SLEEP

Cls

If $z1 \leq 0.537$ Then

$c1 = (pi * z1) / 2$

$c2 = \text{Sqr}(1 - c1 ^ 2)$

$d1 = \text{Atn}(c2 / c1)$

$d2 = d1 + pi$

$d3 = d2 + pi$

Print "d1+="; d1; "d2+="; d2; "d2-="; d3

SLEEP

Cls

```

For d = d1 To 4.483934 Step 0.1
s1 = Cos(d1) + z1 * d1
y = a1 * (s1 * (d - d1) - (Sin(d) - Sin(d1))) - (z1 / 2) * (d ^ 2 - d1 ^ 2))
s2 = Sin(l2) - f * Cos(l2) * Sin(u3)
x = ((g / w ^ 2) * (-s2 * d1 * (d - d1) + s2 * ((d ^ 2 - d1 ^ 2) / 2)) * 3.21)
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Print " "
Next d
End If
SLEEP
Cls
If z1 < 0.537 Then
For d = d2 To 4.93905 Step 0.1
s4 = Cos(d2) + z2 * d2
y = a1 * (s4 * (d - d2) - (Sin(d) - Sin(d2))) - (z2 / 2) * (d ^ 2 - d2 ^ 2))
s5 = Sin(l2) - f * Cos(l2) * Sin(u3)
x = ((g / w ^ 2) * (-s5 * d2 * (d - d2) + s5 * ((d ^ 2 - d2 ^ 2) / 2)) * 3.21)
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Print " "
Next d
End If
If z1 > 0.537 Then
d4 = Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
flag = 0
For d = d4 To 2 * pi Step 0.001
v1 = Cos(d4) - Cos(d) - z1 * (d - d4)
If v1 <= 0 And flag = 0 Then
d5 = d
flag = 1
End If
Next d
d6 = d4 + pi

```

```

flag = 0
For d = d6 To 4 * pi Step 0.001
v2 = Cos(d6) - Cos(d) - z2 * (d - d6)
If v2 >= 0 And flag = 0 Then
d7 = d
flag = 1
End If
Next d
For d = d4 To d5 Step 0.001
s3 = Cos(d4) + z1 * d4
y = a1 * (s3 * (d - d6) - (Sin(d) - Sin(d6)) - (z1 / 2) * (d ^ 2 - d6 ^ 2))
x = (g / w ^ 2) * (-s2 * d4 * (d - d4) + s2 * ((d ^ 2 - d4 ^ 2) / 2))
Print "y="; y; "x="; x; "d="; d
Next d
End If
Y1 = 2 * a1 * Sqr(1 - ((pi * z1) / 2) ^ 2)
X1 = ((2 * pi ^ 2 * g) / w ^ 2) * s2
Print "y+="; Y1; "x="; X1
End

```

ДОДАТОК Б

Програма розрахунків початку та закінчення відносного руху частинки
нижнього шару робочої поверхні

```
Cls
g = 9.81
pi = 3.141592654
a1 = 0.025
n = 250
l1 = 7.1
f1 = 0.1
f2 = 0.1
f3 = 0.3
m1 = 0.68
l2 = (l1 * pi) / 180
w = (pi * n) / 30
a2 = a1 * w ^ 2
u1 = Atn(Sin(l2) / Sqr((f3 * Cos(l2)) ^ 2 - (Sin(l2)) ^ 2))
u2 = Atn((g * Sin(l2)) / a2)
u3 = (u1 + u2) / 2
p1 = Atn(f1)
p2 = Atn(f2)
c1 = m1 * f3 * Cos(l2) * (Sin(u3 - p2) / Cos(p2))
c2 = (1 + m1) * (Sin(p1 - l2) / Cos(p1))
z1 = (g / (a2 * (Sin(p2) / Cos(p2)))) * (c1 -
c2) Print "A=="; a1; "n="; n; "w="; w; "Aw^2=";
a2 Print "z+="; z1; "c1="; c1; "c2="; c2 SLEEP
Cls
If z1 < 0.64 Then
d1 = pi - Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
d2 = 2 * pi - Atn(z1 / Sqr(1 - z1 ^ 2))
Print "d1-1="; d1; "d2-1="; d2
```



```

flag = 0
For d = pi To d2 Step 0.001
v2 = z1 * (pi - d1) - 1 - Cos(d1)
v1 = v2 + z1 * (d - pi) - (Cos(d) + 1)
If v1 <= 0 And flag = 0 Then
d3 = d
flag = 1
End If
Next d
End If
Print "d1-1="; d1; "d2-1="; d3
SLEEP
Cls
X1 = (z1 / 2) * (pi ^ 2 - d1 ^ 2) - Sin(d1) - (z1 * d1 + Cos(d1)) * (pi - d1)
X2 = X1 + (z1 / 2) * (d3 ^ 2 - pi ^ 2) - Sin(d3) - (2 + z1 * d1 + Cos(d1)) * (d3 -
pi)
x3 = X2 / pi
v2 = a1 * w * f2 * x3
Print "A="; a1; "n="; n; "z+="; z1
Print "vcp="; v2
Print "x1="; X1; "x2="; X2
End

```