

Всеукраїнський конкурс на кращу студентську наукову роботу за напрямком «Галузеве машинобудування» 2019/2020 навчального року

Девіз: «Живильний пристрій»

Тема роботи: «Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу для багаторівневого введення зерна»

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	3
1. Огляд пневмосистем та технічних засобів зерноочисних машин.....	4
2. Живильні пристрої в пневмосистемах ЗОМ. Їх аналіз роботи та напрями вдосконалення.....	11
3. Обґрунтування напрямку дослідження	16
4. Аналіз основних конструктивних параметрів та режимів роботи живильного пристрою пневмосепаратора.....	18
5. Визначення раціональних параметрів пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна.....	23
Висновки	29
Список використаних джерел	30
Додатки.....	34

ВСТУП

Важливою умовою отримання якісного зерна при збиранні та зберіганні врожаю являється своєчасна і ефективна його післязбиральна обробка, яка вимагає наявності високопродуктивних зерноочисних машин (ЗОМ), що забезпечують високу якість виконання технологічного процесу з доведенням зернового матеріалу до встановлених кондицій по чистоті і вологості.

Незважаючи на універсальні можливості повітряної сепарації, внаслідок чого вона здобула широке використання при очищенні зерна, якісні показники її роботи у виробничих умовах залишаються низькими, а сепаратори, які використовуються для вказаних цілей в більшості господарствах є застарілими та енергоємними [1].

Аналіз роботи пневмосепаруючих каналів (ПСК) показав, що вагомим фактором, який впливає на якість пневмосепарації, є нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку, що виникає внаслідок збільшення аеродинамічного опору в зонах введення та виведення матеріалу. Вирішення цієї проблеми можливо шляхом застосування живильних пристроїв, які дозволять зменшити опір повітря в зоні сепарації за рахунок рівномірної подачі зернового матеріалу та, як наслідок, сприяють вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку.

Тому дослідження, спрямовані на підвищення якості роботи ПСК зерноочисних машин (ЗОМ) шляхом застосування нових живильних пристроїв, що дозволяють покращити рівномірність розподілу зернового матеріалу в зоні сепарації, є актуальними.

Метою досліджень є підвищення якості аеродинамічного очищення зерна шляхом обґрунтування параметрів живильного пристрою ПСК для багаторівневого введення зерна.

Для досягнення поставленої мети було висунуто *наукову гіпотезу*, згідно з якою підвищення якості пневмосепарації можна досягти шляхом розшарування зернового потоку при введенні в ПСК багаторівневим живильним пристроєм та виведенням через жалюзійну стінку.

Процес перевірки даної гіпотези передбачає вирішення наступних задач:

- проведення аналізу технічних засобів та їх живильних пристроїв для пневмосепарації зерна та визначення перспективного напрямку їх вдосконалення;
- обґрунтування конструкції живильного пристрою ПСК, що забезпечить вирівнювання поля швидкостей повітряного потоку в робочій зоні та збільшення якості очищення зерна;
- визначення основних показників запропонованої конструкції живильного пристрою ПСК та порівняння з найбільш сучасними аналогами.

Об'єкт дослідження – процес повітряної сепарації зернових сумішей в вертикальному ПСК з багаторівневим введенням зерна.

Предмет дослідження – вплив конструктивно-технологічних параметрів живильного пристрою пневмосепаратора для багаторівневого введення зерна та режимів його роботи на якісні показники сепарації.

1. Огляд пневмосистем та технічних засобів зерноочисних машин

Однією з найважливіших операцій при очищенні зернових матеріалів для їх доведення до продовольчих та посівних кондицій і оптимальному виділенні фуражної фракції являється пневмосепараційний процес. Перевага повітряного сепарування перед іншими способами очищення і сортування в його універсальності: повітрям можна розділяти будь-яке зерно - від найдрібнішого (люцерна, мак та ін.) до найкрупнішого (кукурудза, боби).

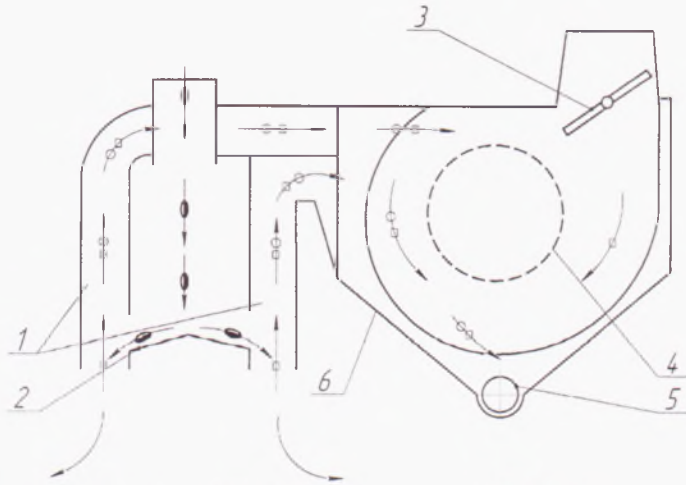
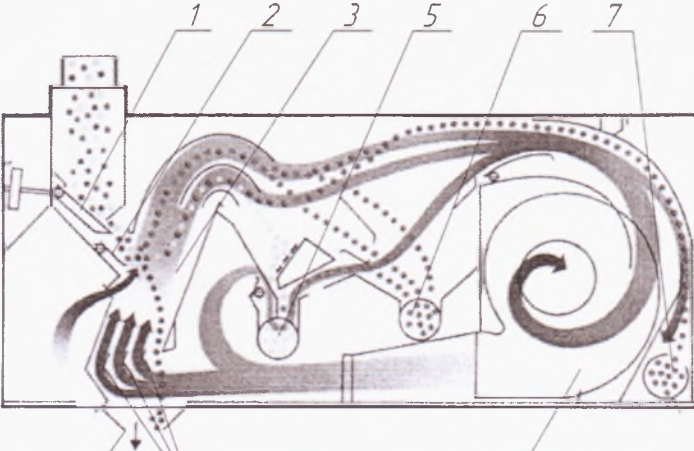
Основним робочим органом, де відбувається аеродинамічне розділення зернового матеріалу, є пневмосепаруючі канали. В пневмосепарації використовують, як правило, вертикальні та горизонтальні ПСК, ефективність роботи яких залежить як від форми, так і від співвідношення конструктивних розмірів, способу завантаження, режиму роботи та ін.

Пневмосепаруючі канали входять до складу повітряних систем ЗОМ, і від ефективності роботи яких, в значній мірі, залежить ефективність роботи

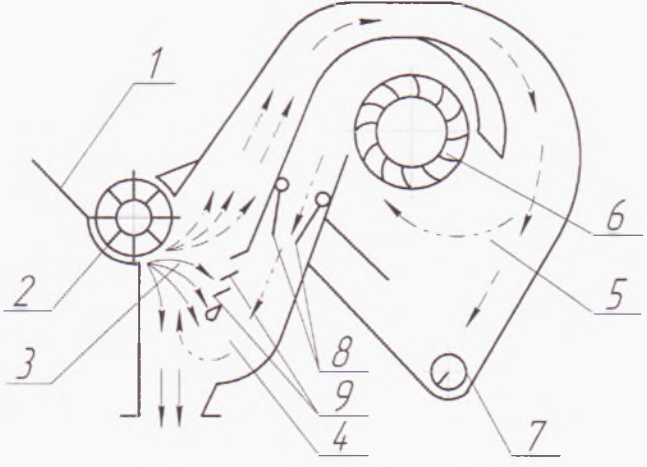
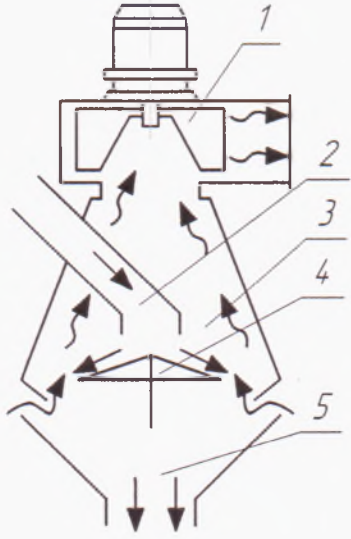
пневмосистеми вцілому. Найбільш поширені повітряні системи приведені в таблиці 1.

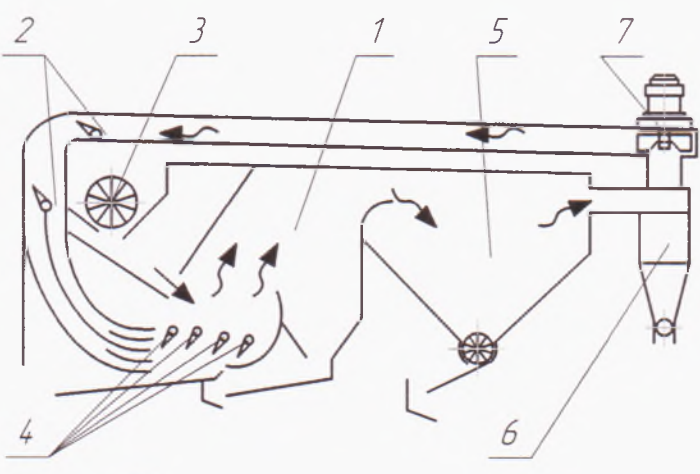
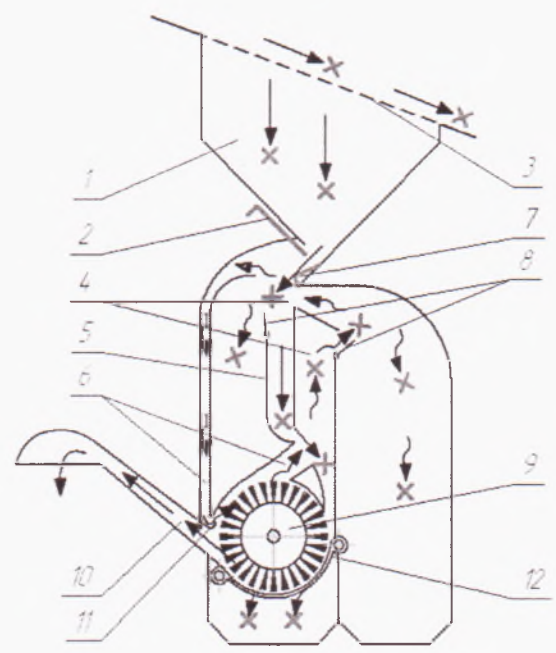
Таблиця 1

Найбільш поширені пневмосистеми ЗОМ

Функціональна схема повітряної системи	Основні переваги та недоліки	Аналогічні схеми
1	2	3
<p style="text-align: center;">ЗД 10.000</p>  <p>1 – ПСК; 2 – приймальна камера; 3 – регульовальна заслінка; 4 – вентилятор; 5 – приймальник легкої фракції; 6 – осадова камера;</p>	<p>Переваги: - має два ПСК, що обробляють матеріал паралельно до решіт, за рахунок чого підвищена продуктивність пневмосистеми. Недоліки: - складність регулювання пневмосистеми, так як збільшення опору в одному ПСК призводить до різкого збільшення швидкості в другому; - суттєво знижується продуктивність пневмосистеми при обробці більш вологої та засміченої зернової маси.</p>	<p>ОВС-25, ОВП-20, SM-120 «Camas», C800D «Ab Line Machiner» (Швеція) [2]; Hance 100, Hance 36 «I. W. Hance Manufacturing Ci» [3].</p>
<p style="text-align: center;">К-560 «Petkus»</p>  <p>1 – дросельний важіль; 2 – клапан-відбивач; 3 – ПСК; 4 – напрямники повітряного потоку; 5 – приймач пошкодженого зерна; 6 – приймач фуражного зерна; 7 – приймач дрібних домішок; 8 – вентилятор 9– приймач очищеного зерна</p>	<p>Переваги: - інтенсифікація введення зернового матеріалу в ПСК; - конструкція нижньої частини каналу забезпечує дворазове послідовне продування матеріалу; - замкнена схема циркуляції повітряного потоку. Недоліки: - складність в переналадженні на очищення різних культур; - висока енерго та металоємність при невисокій повноті розділення (50%).</p>	<p>В модифікації ЗОМ фірми «Petkus» К-523 – в зоні введення встановлені горизонтальні стержні, які додатково розрихлюють зерновий матеріал [2]</p>

1	2	3
<p style="text-align: center;">Пневмосепаратор канадської фірми «Carter Day»</p> <p style="text-align: center;"> —●— Вихідний матеріал —○— Легкі домішки —●— Очищене зерно —○— Повітряний потік —○— Повітря з легкими домішками </p> <p>1 – завантажувальний бункер; 2 – живильний валець; 3 – ПСК; 4- вентилятор; 5- регулювальна заслінка витрат повітря; 6 – осадова камера; 7 – шнек легких відходів; 7 – шнек очищеного зерна;</p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - за рахунок живильного вальця матеріал більш рівномірно розподіляється в робочій зоні ПСК; - дворазове послідовне продування зернового матеріалу повітряним потоком за рахунок конструкції ПСК нижче місця введення, над шнеком очищеного зерна та в місці подачі суміші. <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - обмежена питома продуктивність сепаратора; 	<p>Пневмосепаратори фірми «Carter Day» (Канада) [3], А1-БДЗ-6; А1-БДЗ-12, СП-5 (Російська Федерація), «Simon» (Англія) [4] та ін.</p>
<p style="text-align: center;">Пневмосепаратор «МСК Maschinenbau» (Німеччина)</p> <p style="text-align: center;"> —●— Вихідний матеріал —○— Легкі домішки —●— Очищене зерно —○— Повітряний потік —○— Повітря з легкими домішками </p> <p>1 – розподільчий пристрій; 2 – віброріток; 3, 12 – ПСК; 4 – клапан маятникового типу; 5 – приймальна камера; 6 – відцентровий вентилятор; 7, 10 – дросельні заслінки; 8, 9 – перша та друга осадові камери; 13 – шлюзова заслінка.</p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - використання замкнутого повітряного потоку та діаметрального вентилятора; - дворазове продування матеріалу в зоні введення та в нижній частині каналу; - значно знижена металоемність – в 1,3...1,6 разів та енергоемність – в 2 рази в порівнянні з звичайними пневмосепараторами. <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - нестабільність роботи ПСК, за рахунок їх приєднання до одного вентилятора. Збільшення опору в одному з ПСК призводить до зменшення в другому. 	<p>«Петкус-Гигант» К-531 А, К-527А10 «Petkus» (Німеччина) [5]; СВУ-5А, СМ-4 (Російська Федерація), та ін.</p>

1	2	3
<p style="text-align: center;">МПО-100</p>  <p style="text-align: center;"> ——— Зерновий матеріал - - - Легкі домішки - · - · повітряний потік </p> <p>1, 14 – підпружинені клапани; 2 – нагнітальний канал; 3 – ПСК; 4 – скатні дошки; 5 – підбивач; 6 – соломоприжими; 7 – сітчатий транспортер; 8 – шнек завантажувальний; 9 – клапан; 10 – діаметральний вентилятор; 11 – дросельна заслінка; 12 – осадова камера; 13 – шнек легких домішок.</p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - зерновий матеріал перед потраплянням в ПСК розрихлюється активним вальцем; - конструкція нижньої частини ПСК створює розширену зону сепарації та забезпечує дворазове продування матеріалу; - напроти місця введення встановлені жалюзі, через які зерновий матеріал обробляється зустрічним повітряним потоком; - замкнена схема циркуляції повітряного потоку. <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - невисокий ефект очищення, особливо підвищеної вологості і засміченості. 	<p>МПО -50 СПО-50, (Російська Федерація), [4].</p>
<p style="text-align: center;">Турбінний сепаратор SP-68 «Dauet» (Франція)</p>  <p style="text-align: center;"> ——— - Зерновий матеріал - - - - Повітряний потік </p> <p>1 – вентилятор; 2 – живильник; 3 – ПСК; 4 – розподільчий конус; 5 – приймальник очищеного зерна.</p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - використання кільцевого ПСК, що дає можливість збільшити питомі навантаження; - висока продуктивність при низькій встановленій потужності. <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - незручна компоновка з плоскорешітними робочими органами. 	<p>DA-67 «Dauet» (Франція), та турбінні сепаратори фірм «Oscim» (Італія), «Forsberg» (США), «Damos» (Данія) [3].</p>

1	2	3
<p style="text-align: center;">АКН-200 «Нарле» (Німеччина)</p>  <p> → - Зерновий матеріал ↗ - Повітряний потік </p> <p> 1 – пневмосепаруюча камера; 2 – дросельні заслінки; 3 – живильний валець; 4 – лопатки; 5 – осадова камера; 6 – циклон; 7 – відцентровий вентилятор </p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - застосована фракційна схема технологічного процесу очистки; - використання направляючих лопаток створює додаткове розрихлення матеріалу в зоні пневмосепарації. <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - висока метало - та енергоємність повітряної частини машини; - при збільшенні питомого навантаження можливе забивання направляючих лопаток в пневмосепаруючій камері соломистими домішками. 	<p>Сепаратори фірм: «МСК Maschi-nenba» (Німеччина); «Cimbria» (Данія); «Kamas» (Швеція) та ін. [2].</p>
<p style="text-align: center;">МЗП-10 (КНТУ)</p>  <p> ~ - Повітря, X - Дамшки, → - Очищене зерно </p> <p> 1 – бункер; 2 – заслінка; 3 – колосове решето; 4 – похилий та вертикальний ПСК; 5 – напрямник зернового матеріалу; 6 – повітропроводи; 7 – багатоструменевий ділильник; 8 – регульовальні заслінки; 9 – лопатевий ротор; 10 – відвантажувальний рукав; 11 – ежекційна щілина; 12 – решето. </p>	<p>Переваги:</p> <ul style="list-style-type: none"> - застосована раціональна схема послідовності технологічних операцій; - перед введенням зернового матеріалу в ПСК встановлено багатоструменевий розподільник; - двократна очистка зерна в похилому та вертикальному ПСК; - застосування багатофункціонального робочого органу нового покоління (лопатевий ротор, прямоточно-інерційне самоочисне пруткове решето); - відсутність допоміжних робочих органів для виведення очищеного зерна та відходів; <p>Недоліки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - питома продуктивність повітряної сепарації менша решітної, що ускладнює їх узгодження в одній машині; 	<p style="text-align: center;">-</p>

Порівняльна оцінка роботи горизонтальних та вертикальних повітряних каналів показує, що якість сепарації, в першу чергу, залежить від концентрації

матеріалу в повітряному потоці [6-8, 30]. Визначено, що вертикальні ПСК забезпечують високу якість сепарації при невеликих подачах [6, 29, 31].

Це пояснюється тим, що «ширина повітряного потоку» дорівнює глибині повітряного каналу, тому в вертикальних каналах він створює більш тривалу дію на матеріал і результати отримують стабільніші [8].

При розробці сепаратора ЗС-50 були проведені дослідження ПСК з вертикально-направленим повітряним потоком щодо вибору форм та конструкції (рис. 1), які дозволили зробити їх порівняльну оцінку [9].

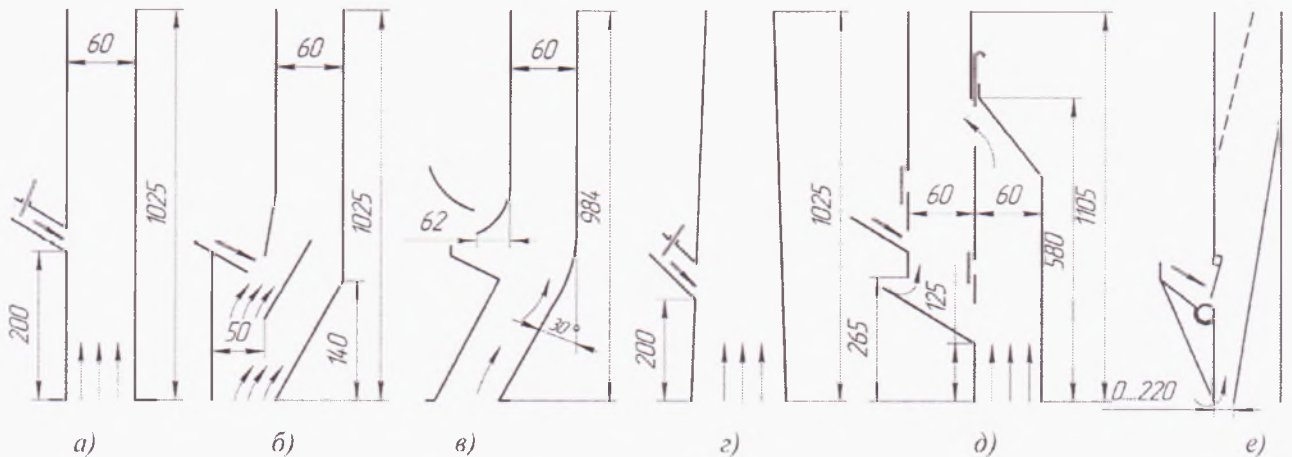


Рис. 1. Схеми експериментальних ПСК:

а) – прямокутний постійного перерізу; б, в) – похилі з подвійною продувкою і поворотним клапаном; г) – конічний, звужений догори; д) – подвійний; е) – клиноподібний, розширений догори

Визначено, що всі три типи клиноподібних ПСК, в порівнянні з прямокутним, менш ефективні, в тому числі при значній витраті повітря, а найбільший ефект очистки забезпечується в вертикальному прямокутному каналі постійного перерізу і конічному каналі (рис. 1, а, г) [10].

Найбільш різносторонньо до питання порівняння ефективності ПСК підійшов А.С. Матвеев [11], дослідження якого проводились на каналах з прямокутною, квадратною, круглою та кільцевою формою поперечного перерізу. Як відзначає автор, товщина зернового потоку, яка подається в ПСК, знаходиться в обернено пропорційній залежності від ширини впускного вікна. Наприклад, в каналах з квадратною та круглою формами перерізу, площа перерізу яких однакова, товщина зернового потоку, що подається в канал

першого, збільшується в три рази, в порівнянні з другим і, відповідно, створюються неоднакові умови для взаємодії повітря з зерновим матеріалом.

Тому, використання ПСК з кільцеподібним та колоподібним перерізом, в яких введення зерна в канал здійснюється радіально, від центру до периферії або до центру по всьому периметру каналу, дозволяє значно підвищити їх продуктивність. Але внаслідок їх незручності компонування з найбільш поширеними на практиці площинно-коливальними решітними сепараторами, вони поки що не знайшли належного застосування в повітряно – решітних сепараторах.

Головним недоліком найбільш поширених вертикальних ПСК прямокутного перерізу являється те, що з підвищенням питомого навантаження суттєво збільшується нерівномірність повітряного потоку в зоні введення та виведення матеріалу, що значно зменшує ефект сепарації.

Відомі деякі технічні рішення, які сприяють вирівнюванню поля швидкостей по глибині ПСК – використання сіток та решіток із гофрованих пластин. При застосуванні сіток в місцях вводу зернового матеріалу в ПСК і виводу з нього, утворюються важко ущільнюючі місця, крім того, в процесі роботи сітка засмічується, що підвищує її опір та викликає деформацію епюри швидкісного поля потоку та зниження його середньої швидкості [8].

Безумовно, конструктивні елементи, які встановлюються в ПСК, або в пневмосистемах ЗОМ, сприяють покращенню структури поля швидкостей повітряного потоку та підвищують якість очищення. Але при цьому, збільшується опір ПСК, що підвищує його енергоємність та погіршує загальну технологічну ефективність пневмосепарації.

Із приведенного огляду можна зробити висновок, що підвищення якості сепарації можливе за рахунок послідовного очищення та доочищення зернової суміші, розширення робочої зони пневмосепарації, а саме, часу та площі контакту зернової суміші з повітряним потоком, збільшення та зміни геометрії ПСК, встановлення допоміжних елементів в ПСК (жалюзі, ділильники, тощо).

2. Живильні пристрої в пневмосистемах ЗОМ. Їх аналіз роботи та напрями вдосконалення.

Одним із способів, які сприяють вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку є використання живильних пристроїв ПСК.

Вони повинні забезпечувати умови при яких відбувається направлена тонкошарова подача зерна в повітряний потік. Це дозволяє покращити взаємодію компонентів зернового матеріалу з повітряним потоком, посилюючи тим самим ознаку розділення, а також звести до мінімуму контактування частинок зернової суміші, що суттєво підвищує ефективність роботи повітряного потоку [9, 12].

Тому, досягнувши рівномірної подачі зернового матеріалу, можна отримати більш вирівняне поле швидкостей повітряного потоку, підвищити якість сепарації і, відповідно, ефективність роботи ПСК [9].

На практиці використовуються вальцеві, лопатеві, стрічкові, аераційні дискові, гравітаційні та вібраційні живильники, класифікація живильних пристроїв приведена на рис. 2.

Аераційний живильник призначений для надання компонентам зернового матеріалу необхідної швидкості повітряного потоку перед їх потраплянням в повітряне середовище. Одним з основних недоліків вентиляторного живильника є низький коефіцієнт корисної дії, оскільки для розгону важких компонентів матеріалу необхідна значна довжина каналу, інакше компоненти вилітатимуть з живильника із швидкістю меншою, ніж швидкість повітряного потоку.

Вальцеві живильні пристрої складаються з двох роликів, що обертаються з однаковою швидкістю в різні боки. До переваг таких живильників можна віднести компактність і простоту конструкції.

Основним недоліком вальцевих живильників є наявність зазору між вальцями, в наслідок чого, у разі перенавантаження можливе травмування зерна, а також зниження швидкості обертання вальців, що впливає на швидкість вкидання компонентів суміші [13].

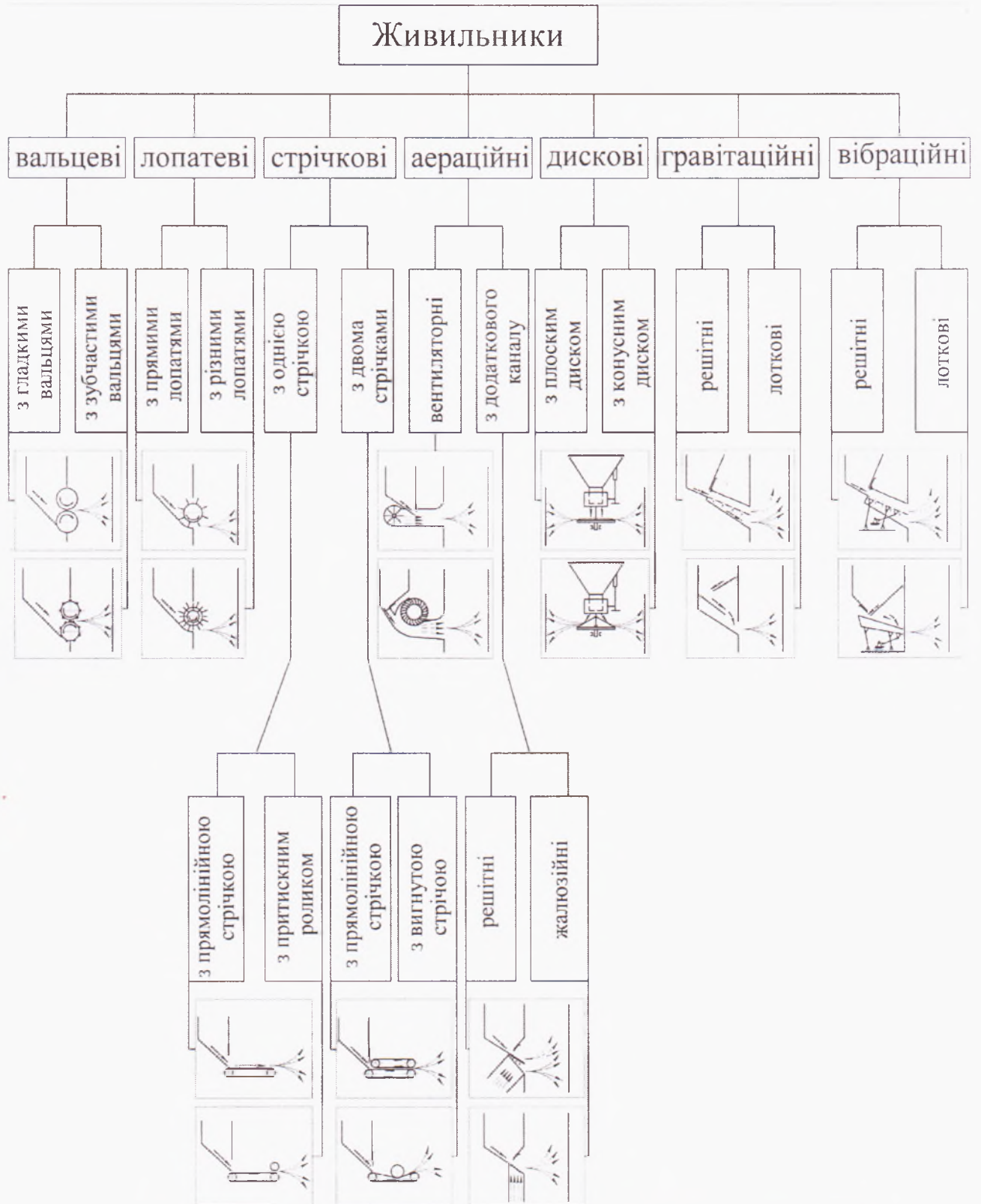


Рис.2. Класифікація живильних пристроїв пневмосепараторів

Широке застосування набули лопатеві живильники. В порівнянні з іншими живильниками вони мають ряд істотних переваг: простота конструкції, технологічна і конструктивна надійність, невеликі габаритні розміри. Такі

живильники можуть вкидати компоненти зернового матеріалу, як в рухомий, так і в нерухомий повітряний потік. Недоліком даного типу живильників є те, що зерновий матеріал подається з недостатньою рівномірністю по площі поперечного перерізу ПСК. Крім того, компоненти зернової суміші потрапляють в канал під різним кутом і різною швидкістю, при цьому також виникає порційна подача [13].

В конструкції лопатевого живильника [14], робочий орган якого виконаний у вигляді набору різних по діаметру циліндричних втулок з лопатями (рис. 3, а), за рахунок чого відбувається більш рівномірний розподіл зернового матеріалу не тільки по ширині, а й по глибині ПСК.

Авторами [15] запропонований лопатевий живильник (рис. 3, б), центральна частина якого виконана пустотілою, і з'єднана з додатковим повітряним каналом, за рахунок чого відбувається додаткове розшарування зернового матеріалу перед введенням в ПСК.

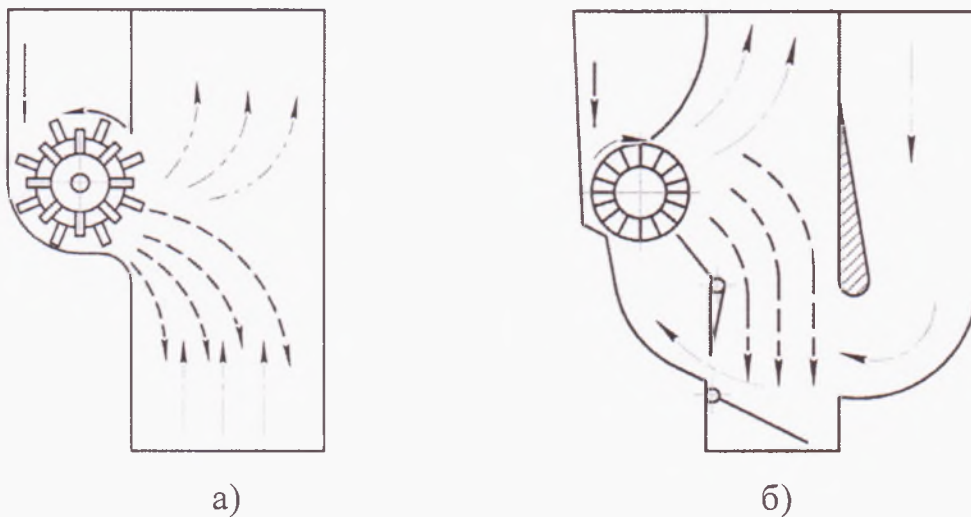


Рис. 3. Лопатеві живильники ПСК: а) – з циліндричними втулками; б) – пустотілий

В якості живильників можливо також використання комбінованих робочих органів. Так автори [16] представили пневмосепаратор, що має бункер 1, ПСК 3, живильник 2, поверхня якого виконана у вигляді решета 5 однополосного гіперболоїда обертання (рис. 4), причому центральна частина живильника порожниста.

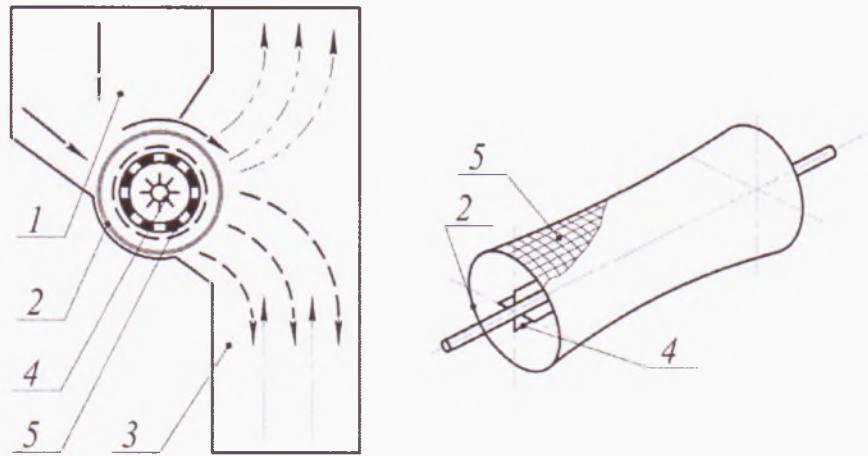


Рис. 4. Живильник в вигляді однополюсного гіперболоїда обертання

Встановлені всередині на валу активатори 4 сприяють більш рівномірному розподілу зернового матеріалу по поверхні живильника, що дозволяє вводити його в розшарованому вигляді в ПСК.

При введенні зернової суміші в ПСК використовуються також вібраційні живильники, робочі органи яких виконують коливальні рухи. Застосування таких живильників дає можливість більш рівномірно вводити зернову суміш не тільки по ширині, а й по висоті. За рахунок коливальних рухів відбувається піднімання більш легких та крупних домішок в верхні шари, що безумовно сприяє більш ефективному їх розділенню. Як вказано авторами в роботі [17] подача зернового матеріалу за допомогою вібралотків при певних умовах сприяє само сортуванню зернової суміші і введенні в ПСК в вигляді багат шарового потоку.

Але основним недоліком всіх активних живильників, в тому числі аераційних, є наявність додаткового енергоживлення, використання вентиляторів, електродвигунів, в наслідок чого підвищується енергоємність очищення та складність їх конструкції.

Найбільш широкого застосування набули гравітаційні живильники за рахунок їх простоти та надійності конструкції. Одним із самих поширених прикладів такого живильника є введення зернового матеріалу по похилому лотку.

В пневмосистемі ЗОМ Petkus K-560 [5] в якості гравітаційного живильника застосовується регульований клапан (табл. 1). Перед введенням в

ПСК зерновий матеріал падає вільною струєю поблизу отвору і, відбиваючись від клапану, зернові частинки, маючи різні пружні властивості, потрапляють в канал з різними траєкторіями та швидкостями, створюючи меншу щільність та збільшуючи взаємодію частинок з повітряним потоком.

В ПСК ЗОМ МПО-50 [4] застосований гравітаційний живильник решітного типу, завдяки якому важка фракція просипається крізь решето, тому крупні домішки вводяться в ПСК над основним зерном.

Авторами [18] запропонований дворівневий гравітаційний живильник (рис. 5, а), лотки якого виконані ступінчасто, в шаховому порядку, при цьому, кут введення у половини лотків відрізняється. Тому, зерновий матеріал, крім того, що розподілений на окремі струмені, потрапляє в ПСК на різній висоті і з різною швидкістю введення, що обумовлює більш рівномірне заповнення його по периметру ПСК та сприяє вирівнюванню поля швидкостей повітряного потоку.

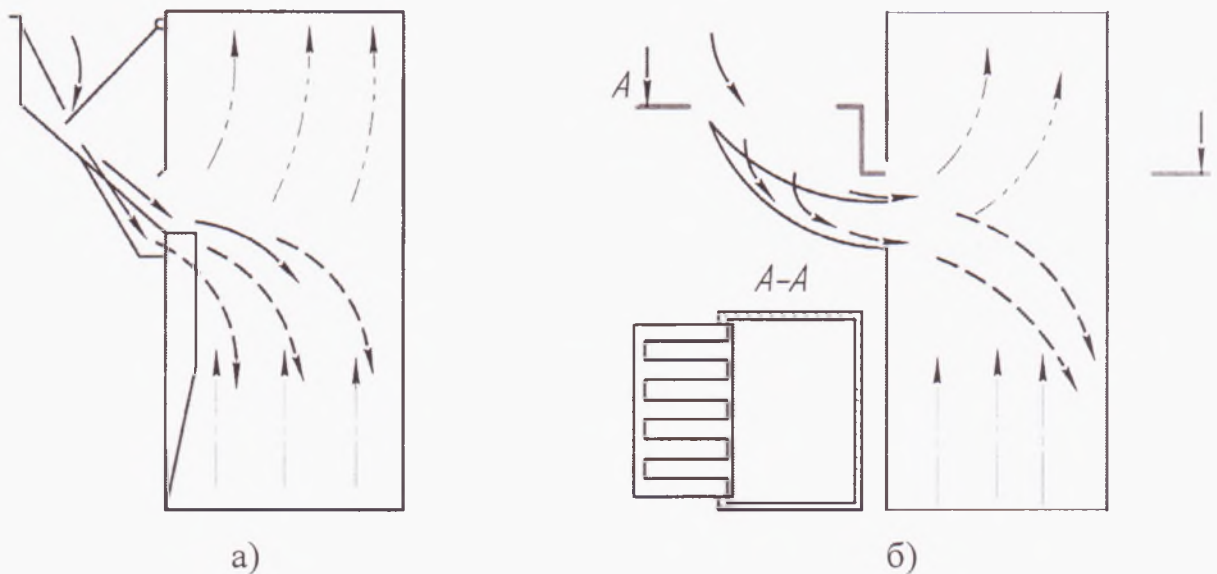


Рис. 5. Дворівневі гравітаційні живильні пристрої

А в конструкції пневмосепаратора [19] (рис. 5, б) в якості живильника використовуються лотки з приймальними і сходовими поверхнями, розташовані один над одним. Приймальні краї лотків з'єднані одна до одної, а в лотках виконані щілини, направлені вздовж руху матеріалу, причому щілини верхнього лотка зміщені відносно щілин нижнього лотка. Але в процесі

роботи існує велика вірогідність забивання щілин лотків соломистими частинками.

Тавтілов І.Ш. [20], запропонував багатоярусний живильник, лотки якого розташовані один над одним та під різними кутами відносно напрямку повітряного потоку. Це дає змогу рівномірно заповнити робочу зону по глибині ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку. Недоліком такого пневмосепаратора є обмеження продуктивності кожного ярусу, оскільки при збільшенні загального питомого навантаження буде погіршуватись епюра швидкостей повітряного потоку та порушуватись умови розділення зернового матеріалу, що суттєво зменшить його ефективність.

А.К. Туров [12] рекомендує проводити попереднє розшарування зернової суміші перед її вводом в ПСК поперечно-зустрічним повітряним потоком з допоміжного повітряного каналу. При цьому, швидкість виходу струменів повітря із паралельно встановлених пластин в 1,5 рази вища швидкості витання компонентів вихідного матеріалу, що дозволяє більш інтенсивно винести в верхній шар легкі домішки.

Таким чином, з проведеного огляду можна зробити висновок, що підвищення інтенсифікації пневмосепарації в значній мірі можливе за рахунок створення оптимальних умов введення та розподілу зернового матеріалу в робочій зоні ПСК, які сприяють зменшенню вірогідності зштовхувань компонентів суміші при розділенні, зменшують опір повітрю в зоні введення, за рахунок чого вирівнюється поле швидкостей та підвищується ймовірність виділення легкого компоненту.

3. . Обґрунтування напряму досліджень

Враховуючи проведений аналіз, з метою підвищення якості процесу розділення зерна повітряним потоком нами запропонована конструкція пневмосепаратора, яка дозволяє забезпечити рівномірне розміщення зернового матеріалу в ПСК та вирівняти поле швидкостей повітряного потоку в зоні введення та виведення [21, 22].

Запропонований повітряний сепаратор (рис. 6) складається із приймального бункера 1 з заслінками 2, живильника 3, пневмосепаруючого каналу 4 з жалюзійною задньою стінкою 7 та вивідного герметичного каналу 5.

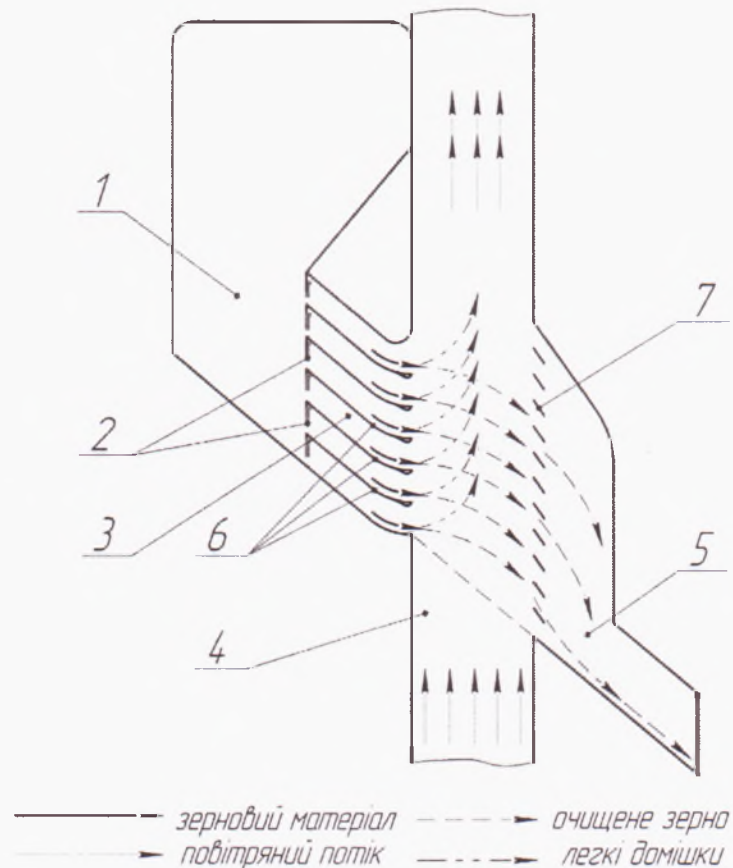


Рис. 6. Схема живильного пристрою з багаторівневим введенням матеріалу в ПСК

Живильник 3 виконано у вигляді похилого каналу з декількома направляючими поверхнями 6, нижні кінці яких з'єднані з передньою стінкою ПСК, а верхні з боковою стінкою бункера.

Використання запропонованого багаторівневого живильника забезпечує розділення зернового матеріалу на декілька обмежених за продуктивністю потоків, які поступають в різні по висоті робочі зони ПСК. Виведення очищеного зерна з ПСК відбувається через жалюзійну решітку в задній стінці.

Цим забезпечується зменшення опору повітряного потоку як біля зони введення, так і при виведенні, збільшення його рівномірності та покращення умов для видалення легких домішок, що дозволяє суттєво підвищити ефективність повітряної сепарації [23-25].

4. Аналіз основних конструктивних параметрів та режимів роботи живильного пристрою пневмосепаратора

Однією з основних задач, яка спрямована на забезпечення високої ефективності роботи сепаратора, є обґрунтування основних параметрів живильного пристрою ПСК, які б забезпечили рівномірне розміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепарації.

Тому, для створення найбільш сприятливих умов сепарації в ПСК запропонована в даній роботі конструкція живильного пристрою повинна забезпечити однакові режими введення зерна по всім напрямним поверхням.

Рух зернового матеріалу в пневмосепараторі з живильним пристроєм для багаторівневого введення можна умовно поділити на декілька етапів (рис. 7).

1. По прямолінійній розгінній ділянці направляючої поверхні гравітаційної кривої живильного пристрою;
2. По дугоподібній ділянці направляючої поверхні гравітаційної кривої живильного пристрою;
3. Від передньої до жалюзійної стінки в ПСК.

Для створення найбільш раціональних умов розділення при багаторівневому введенні зерна в ПСК, параметри прямої поверхні живильного пристрою (довжина L_p , кут нахилу α розгінної та радіус r дугоподібної ділянок) повинні забезпечити подачу матеріалу горизонтально, з необхідною швидкістю введення v_e .

На першому етапі руху зернового матеріалу після витікання з бункеру, при якому він має початкову швидкість v_0 , його рух по прямолінійній ділянці довжиною L_p під кутом нахилу α повинен забезпечувати швидкість v_1 , з якою зерновий матеріал потрапляє на дугоподібну ділянку радіусом r . Після її проходження матеріал набуває швидкості v_2 або v_e , яка необхідна для введення зерноsumіші в ПСК та забезпечення відповідного питомого навантаження q_{bi} .

Після проходження відстані, що відповідає глибині каналу C , зернова фракція набуває швидкості v_k , з якою проходить через жалюзійну стінку і

потрапляє в герметичний вивідний канал, а легкі домішки, під дією повітряного потоку, виділяються в осадову камеру.

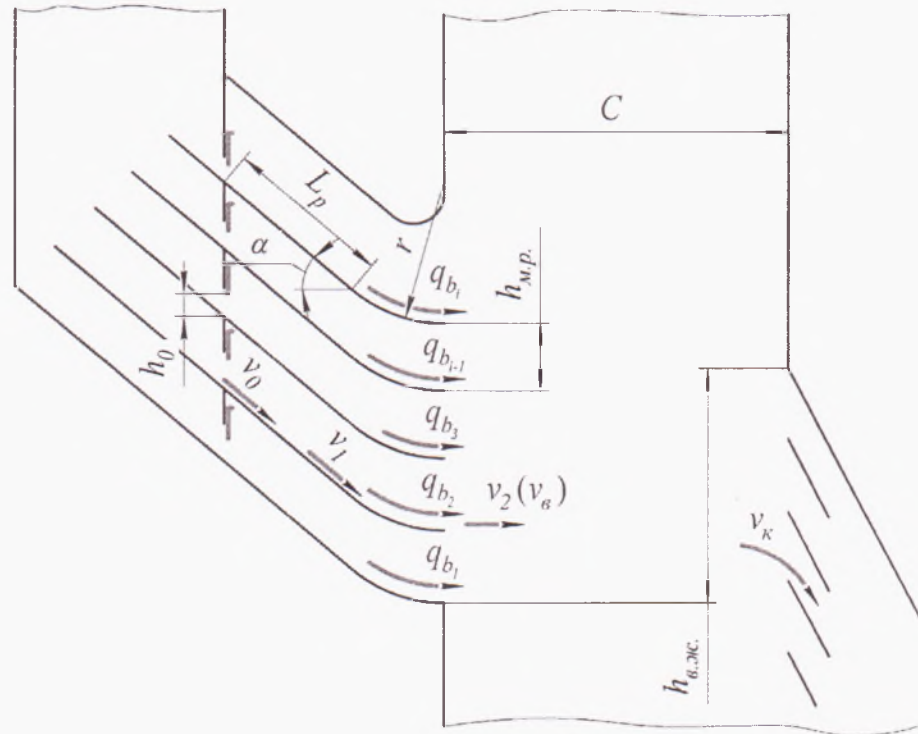


Рис. 7. Схема до визначення основних параметрів живильного пристрою ПСК з багаторівневим введенням матеріалу

Забезпечення величини необхідної швидкості на першому етапі руху відбувається за рахунок вибору раціональних параметрів прямолінійної ділянки живильного лотка (рис. 8), а саме: кута нахилу до горизонту α і його довжини L_p . Відомо [6], що кут нахилу до горизонту α повинен бути більшим за кут тертя зернового матеріалу по поверхні живильного пристрою $\alpha \geq \varphi_{тер}$.

Під час руху по похилій поверхні на частку зернового матеріалу діє сила ваги $G = mg$, нормальна сила реакції опори N та сила тертя $F = fN$ [26].

Диференціальне рівняння руху частки зернового матеріалу по похилій поверхні лотка запишеться у вигляді [26]:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha - fmg \cos \alpha, \quad (1)$$

де $v = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$ – швидкість руху частинки на розгінній ділянці;

f – коефіцієнт тертя;

m – маса частинки

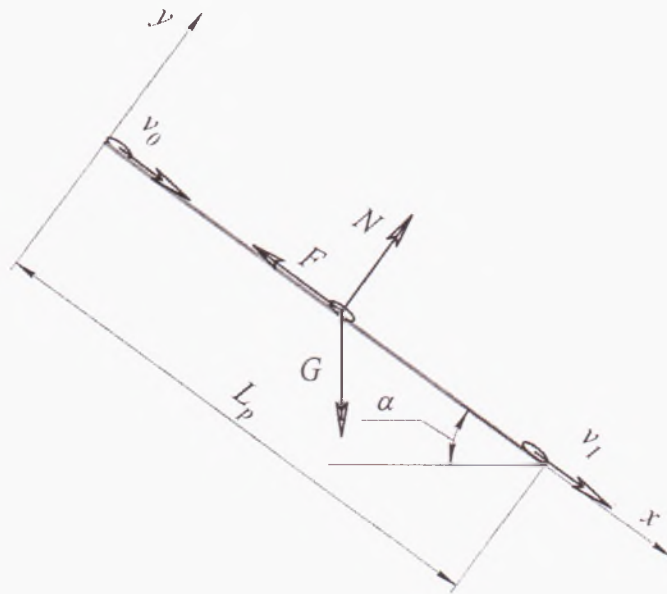


Рис. 8. Схема до визначення початкових умов руху частки по прямолінійній похилій поверхні живильного пристрою або

$$d\dot{x} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha) dt \quad (2)$$

Після проведення стандартних перетворень та спрощень, аналогічно до [26], отримаємо довжину розгінної ділянки:

$$L_p = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2g(\sin \alpha - f \cos \alpha)} \quad (3)$$

Швидкість руху зернового матеріалу в кінці розгінної прямолінійної ділянки буде визначатись рівнянням:

$$v_1 = \sqrt{2gL_p(\sin \alpha - f \cos \alpha)} + v_0 \quad (4)$$

Наступним етапом руху зернового матеріалу є його рух по дугоподібній ділянці направляючої поверхні живильного пристрою (рис. 9).

На початку руху по дузі зерновий матеріал має вхідну швидкість v_1 , при цьому, на зернову частку на цій ділянці діють сила ваги $G = mg$, нормальна сила реакції опори N , сила тертя по поверхні $F_T = fN$ та сила інерції $P = mv^2/r$.

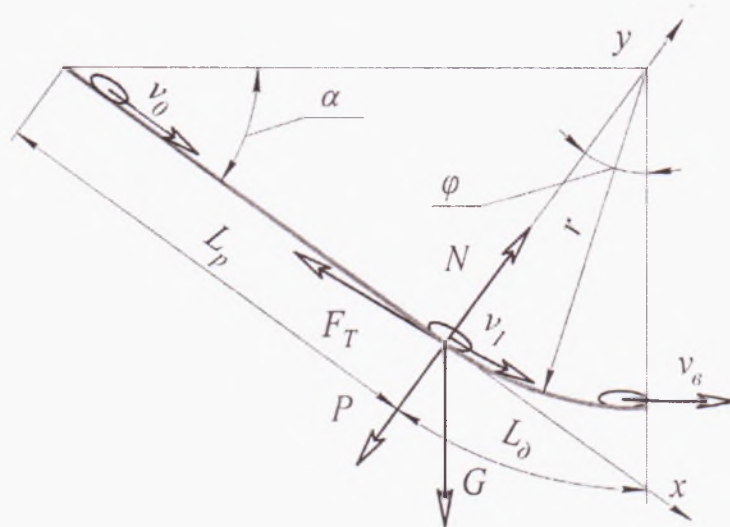


Рис. 9. Рух частки по дугоподібній ділянці направляючої поверхні живильного пристрою

Диференційне рівняння руху зернової частки по дугоподібній ділянці направляючої поверхні живильного пристрою в проекціях на осі рухомої системи координат OXY прийме вигляд [26]:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = mg \cos \varphi - F_T \\ m \frac{v^2}{r} = N - mg \sin \varphi \end{cases} \quad (5)$$

де v – швидкість руху частки на дугоподібній поверхні живильника;

φ – кут, що визначає положення частки на кривій радіусом r .

Виключаючи з системи (5) реакцію N , отримаємо рівняння руху зернової частки на дугоподібній ділянці:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \cos \varphi - fm \frac{v^2}{r} - fmg \sin \varphi, \quad (6)$$

або

$$\frac{dv}{dt} = g(\cos \varphi - f \sin \varphi) - f \frac{v^2}{r}. \quad (7)$$

Після вирішення системи рівнянь, відповідних спрощень та перетворень, швидкість введення зернової суміші в ПСК буде дорівнювати:

$$v_s = \left\{ v_1^2 e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1+4f^2} \left\{ 3f \cos \varphi + (1-2f^2) \sin \varphi - \right. \right. \\ \left. \left. - [3f \sin \alpha + (1-2f^2) \cos \alpha] e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

або враховуючи (4)

$$v_s = \left\{ [2gL_p(\sin \alpha - f \cos \alpha) + v_0^2] e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{2gr}{1+4f^2} \left\{ 3f \cos \varphi + (1-2f^2) \sin \varphi - \right. \right. \\ \left. \left. - [3f \sin \alpha + (1-2f^2) \cos \alpha] \cdot e^{-2f\left(\varphi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)} \right\} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

За отриманим рівнянням (9) побудовані графічні залежності зміни швидкості руху зернового матеріалу по гравітаційній направляючій від її параметрів (рис. 10).

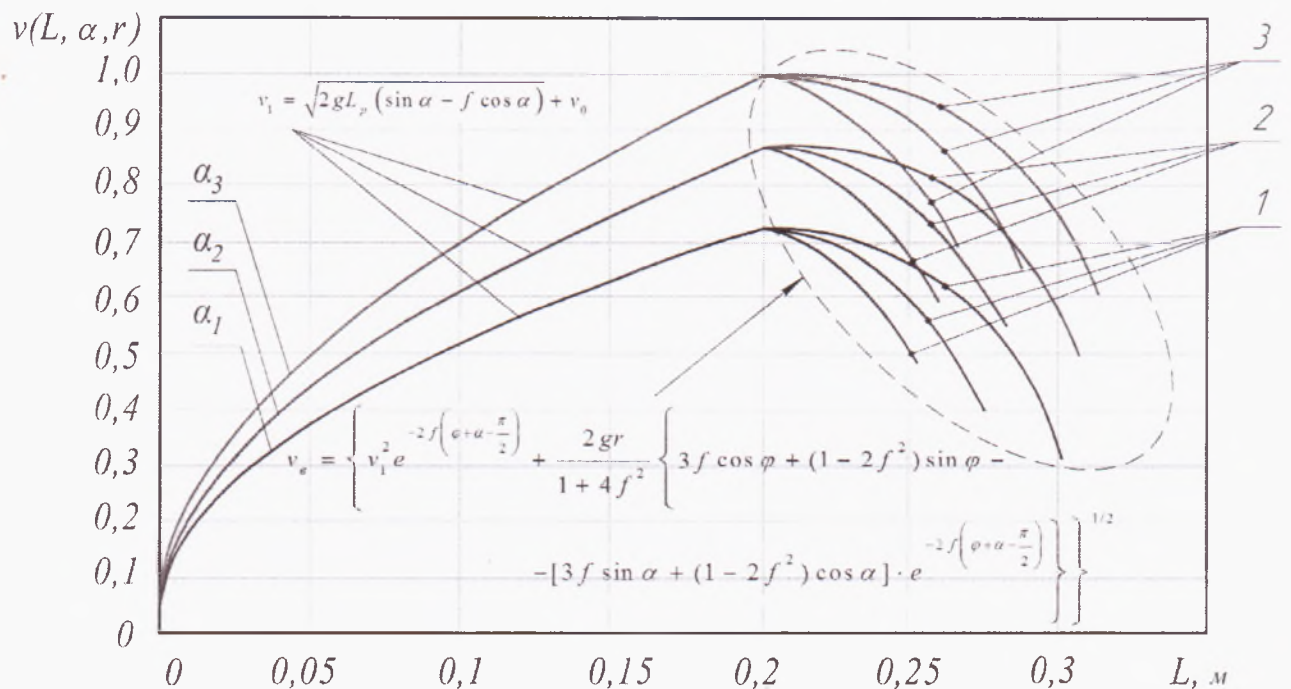


Рис. 10. Залежність швидкості руху зернового матеріалу по гравітаційній направляючій живильного пристрою при довжині розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м; $\alpha_1 = 30^\circ$; $\alpha_2 = 33^\circ$; $\alpha_3 = 36^\circ$. 1) – $r = 0,1$ м; 2) – $r = 0,15$ м; 3) – $r = 0,2$ м

З отриманих залежностей (рис. 10) видно, що під час руху по прямолінійній ділянці швидкість руху зернового матеріалу зростає по параболічному закону, і чим більший кут нахилу α та довжина розгінної ділянки L_p , тим динамічніше відбувається збільшення швидкості.

Збільшення радіусу дуги направляючої призводить до зменшення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК v_e . Відповідно, чим менший радіус r , тим менше змінюється величина швидкості введення в ПСК v_e по відношенню до тієї, яка отримується в кінці розгінної ділянки v_l . Так, при довжині розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, куті її нахилу $\alpha = 30^\circ$ та радіусі дуги $r = 0,1$ м швидкість введення зернового матеріалу становить $v_e = 0,48$ м/с, тобто зміна по відношенню до v_l становить 0,24 м/с. Але при такому радіусі, як показують попередні дослідження, вказаної довжини дуги недостатньо для отримання стабільного горизонтального напрямку подачі зерна в ПСК, оскільки частина зернового струменя спрямовується лише на її крайню частину.

Отже, для забезпечення вищезначених умов руху зернового матеріалу зі швидкістю введення в ПСК $v_e = 0,5 \dots 0,6$ м/с, раціональними параметрами направляючої гравітаційної кривої для зернових культур з коефіцієнтом внутрішнього тертя $\varphi_{тер} = 0,47 \dots 0,73$ є: довжина розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$ та радіус дугоподібної ділянки $r = 0,15$ м [6].

5. Визначення раціональних параметрів пневмосепаратора з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна

Програмою експериментальних досліджень передбачалось: визначити основні фізико-механічні властивості вихідного зернового матеріалу, дослідити вплив параметрів ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення матеріалу на якісні показники пневмосепараційного процесу і отримати порівняльну оцінку багаторівневого та традиційного введення зерна.

Для проведення досліджень та визначення раціональних параметрів і режимів роботи пневмосепаратора виготовлено експериментальну установку (рис. 11), конструкція якої представляє собою вертикальний ПСК прямокутного

поперечного перетину, з можливістю регулювання глибини каналу C , а його бокова стінка виготовлена прозорою, що забезпечує можливість спостереження за процесом.

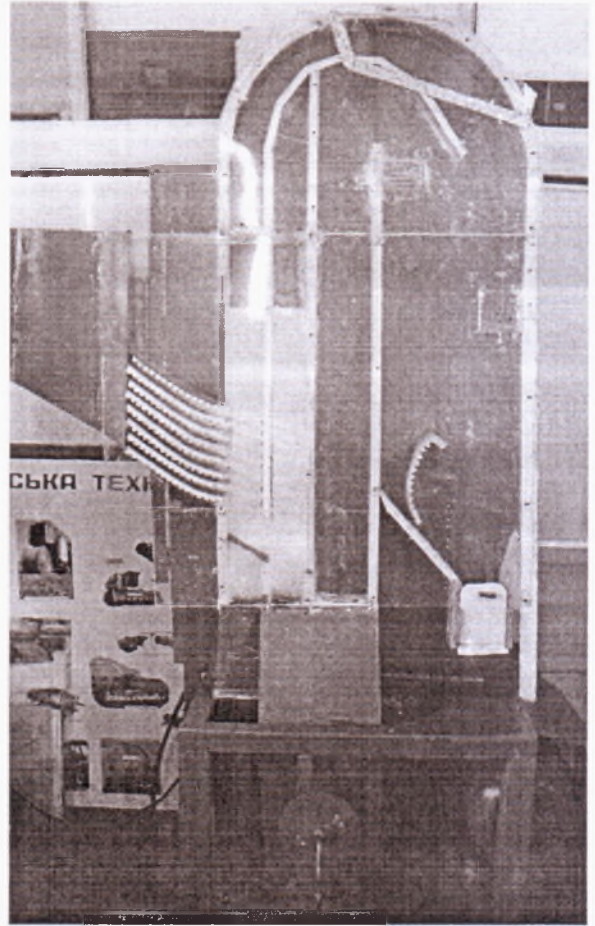
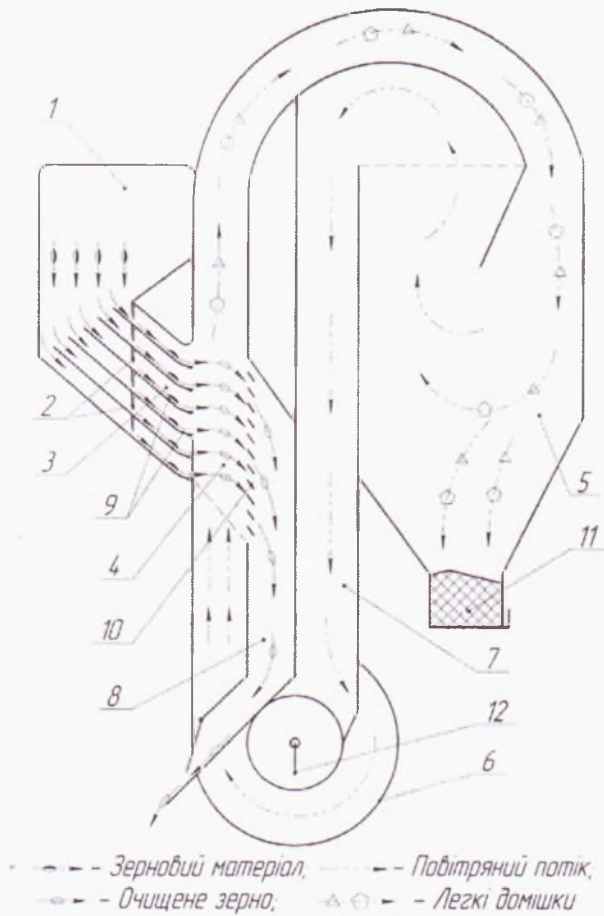


Рис. 11. Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна

Основними складовими частинами установки (рис. 3.3) є: бункер 1, багаторівневий живильний пристрій 3, ПСК 4, вентилятор 6, осадова камера 5 та герметичний вивідний канал 8.

Принцип роботи полягає у наступному: зерновий матеріал із бункера 1 через заслінки 2 потрапляє на направляючі поверхні 9 живильного пристрою 3, які спрямовують його рівномірними потоками в робочу зону ПСК 4 на різні рівні по його висоті. Під дією повітряного потоку, створеного вентилятором 6, вихідний зерновий матеріал розділяється на дві фракції: легкі домішки, які виносяться в осадову камеру 5, та очищене зерно, яке через жалюзійну стінку 10 потрапляє в герметичний вивідний канал 8 і далі по лотку виводиться з ПСК.

Перед проведенням експериментальних досліджень встановлено характеристики вихідного зернового матеріалу. Визначено, що засміченість матеріалу складає 12,4%, а середня швидкість повітряного потоку V_n , при якій відбувається найменше винесення повноцінного зерна в відходи, тобто чіткість сепарації z не перевищує 2%, становить $V_n = 7,5 \dots 7,8$ м/с. Середня вологість вихідного зернового матеріалу складає 15,7 %, а середнє значення об'ємної ваги - 766,26 г/дм³.

Максимальну технологічну ефективність процесу пневмосепарації ПСК з живильним пристроєм для багаторівневого введення зерна можна досягти при раціональних співвідношеннях і взаємодії конструктивних і кінематичних параметрів розробленого пневмосепаратора, чого не можливо досягти при окремому вивченні їх впливу. З метою встановлення закономірності їх взаємного впливу застосовували методику математичного планування багатофакторного експерименту математичної моделі об'єкту досліджень у вигляді рівняння регресії [27].

На основі проведеного теоретичного аналізу та попередніх пошукових експериментальних досліджень можна виділити основні конструктивні і режимні параметри та визначити вплив окремих факторів і їх рівні на процес. З урахуванням цих факторів, що мають значний вплив на процес пневмосепарації зерна приймаємо питома навантаження i - го рівня живильного пристрою на одиницю ширини каналу q_{bi} , глибину каналу C , n – кількість рівнів живильника, V_n – швидкість повітряного потоку.

Параметричні обмеження, які являють собою рівні варіювання факторів наведені в таблиці 2.

При проведенні даних експериментальних досліджень використовувалась вибірка масою 10 кг. Послідовність проведення дослідів визначалась робочою матрицею проведення експериментальних досліджень (табл. 2).

Планування експериментальних досліджень, визначення значимості факторів та обчислення виконували за допомогою пакету прикладних програм «STATISTICA 10» [28].

Рівні варіювання факторів при встановленні раціональних параметрів пневмосепаратора

Таблиця 2

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Нижній (-)	Основний	Верхній (+)	
1	Питоме навантаження на рівень живильника q_{bi} , кг/дм ³ ·год	x_1	250	300	350	50
2	Глибина каналу C , м	x_2	90	100	110	10
3	Кількість рівнів, n	x_3	3	5	7	2
4	Швидкість повітряного потоку V_n , м/с	x_4	6,5	7,5	8,5	1

Виходячи з вище приведених умов критеріями оптимізації для процесу пневмосепарації є:

- повнота розділення зернового матеріалу ε , % ($Y_1 = \varepsilon$)
- кількість повноцінного зерна в відходах z , % ($Y_2 = z$).

В результаті проведення серії дослідів отримано статистичні математичні моделі для повноти розділення $\varepsilon(Y_1)$ та для кількості повноцінного зерна в відходах, $z(Y_2)$:

$$Y_1 = 82,9 - 1,722x_1 + 2,308x_2 - 0,616x_3 + 3,2x_4 - 2,59x_1^2 - 2,17x_2^2 - 3,16x_3^2 - 3,94x_4^2 + 0,4x_1x_2 - 0,5x_1x_3 - 0,662x_1x_4 + 0,287x_2x_3 - 0,1x_2x_4 - 0,47x_3x_4; \quad (10)$$

$$Y_2 = 0,73 + 0,267x_1 + 0,16x_2 + 0,09x_3 + 0,589x_4 + 0,165x_1^2 + 0,155x_2^2 + 0,333x_3^2 + 0,338x_4^2 - 0,003x_1x_2 + 0,016x_1x_3 - 0,047x_1x_4 + 0,016x_2x_3 - 0,022x_2x_4 + 0,021x_3x_4. \quad (11)$$

де x_1 – питоме навантаження на рівень живильника, кг/дм³·год; x_2 – глибина каналу, м; x_3 – кількість рівнів живильника, шт.; x_4 – швидкість повітряного потоку V_n , м/с.

Для детального аналізу експериментальних даних безпосередньо по кожному з факторів приведемо графіки їх впливу на повноту розділення $Y_1(\varepsilon)$ та чіткість сепарації $Y_2(z)$ (рис. 12 – 15).

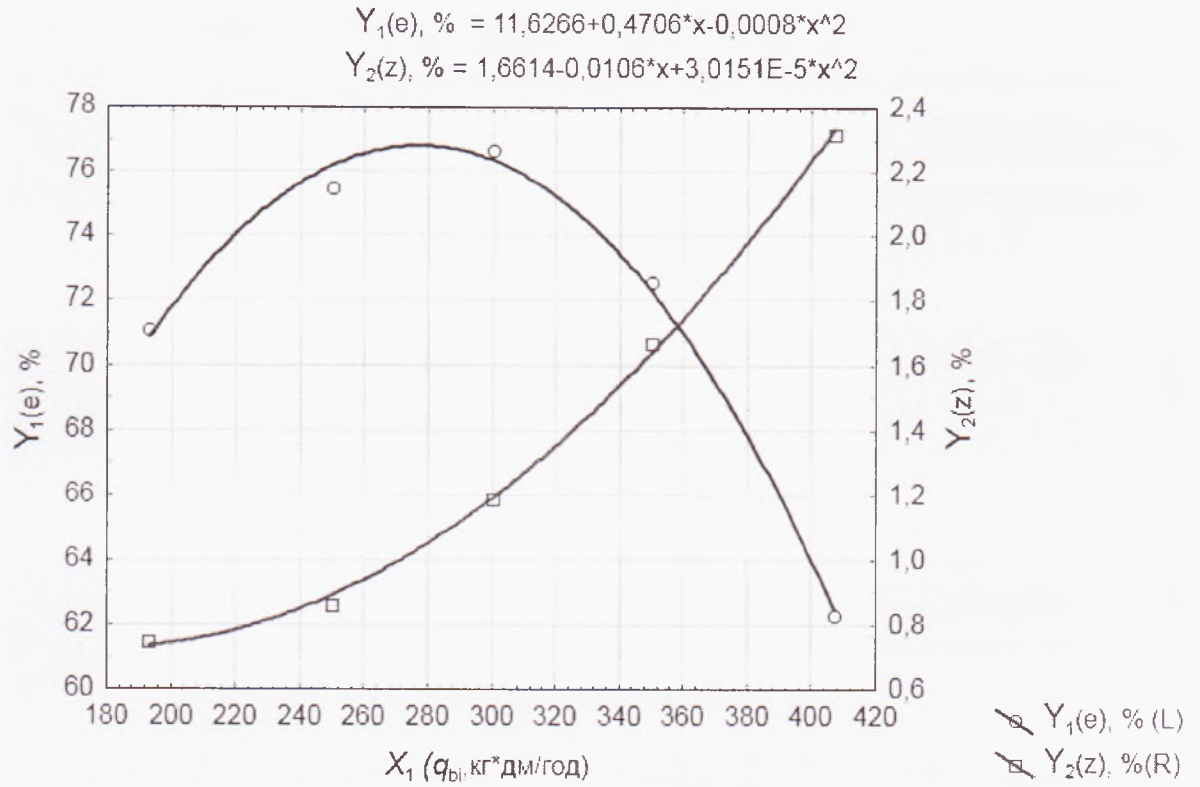


Рис. 12. Вплив питомого навантаження на i -му рівні живильника x_1 (q_{bi}), кг/дм³·год на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

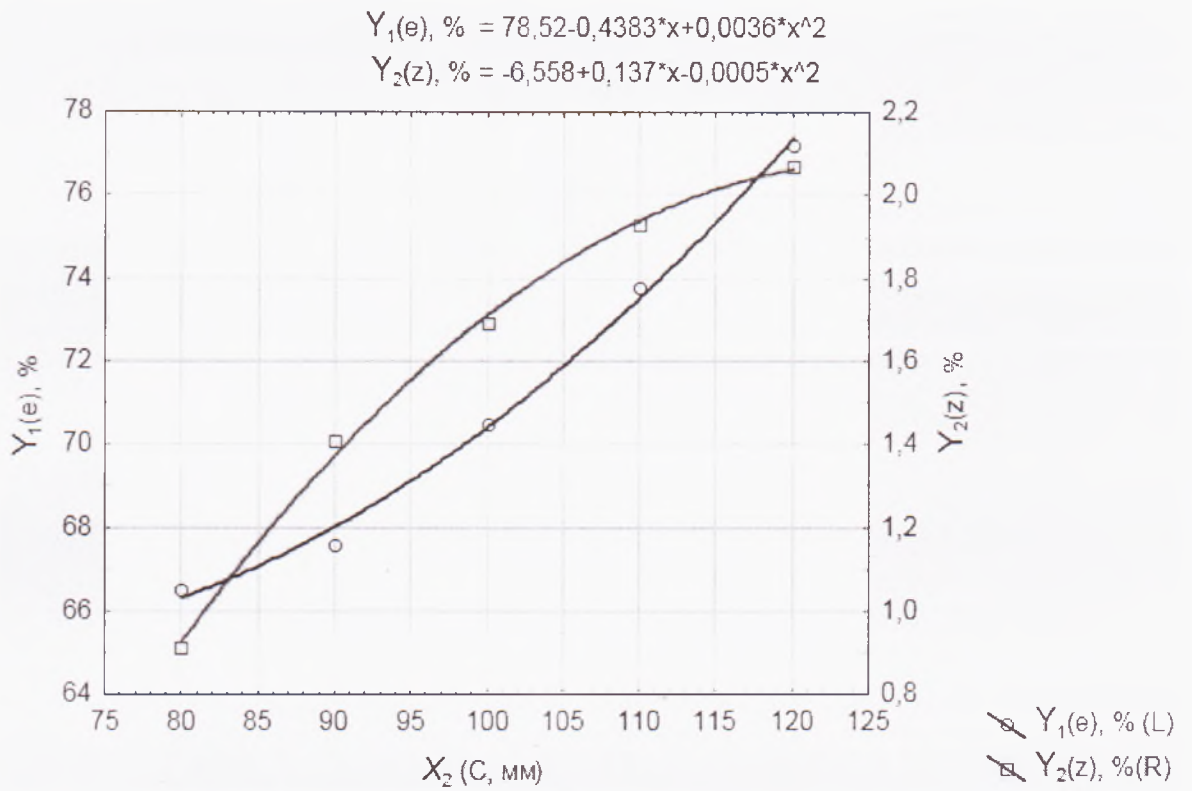


Рис. 13. Вплив глибини каналу $x_2(C)$, мм на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

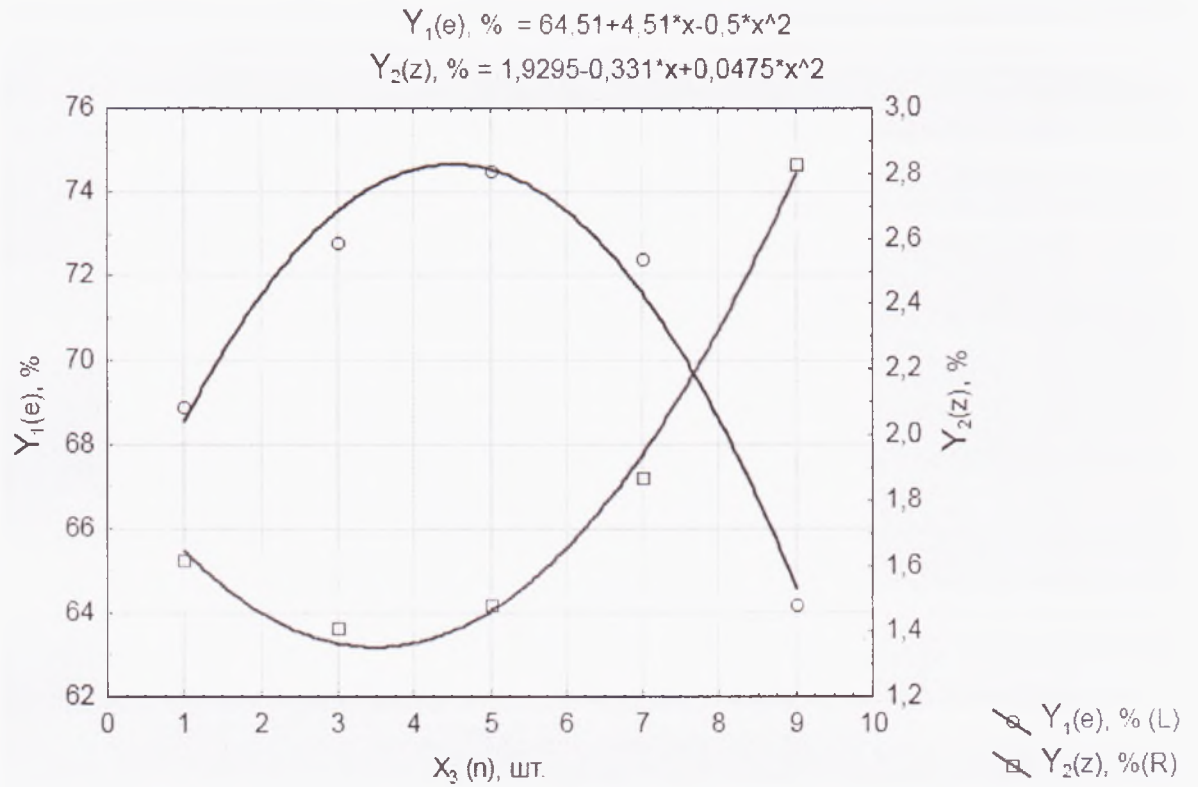


Рис. 14. Вплив кількості рівнів $x_3(n)$, шт на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

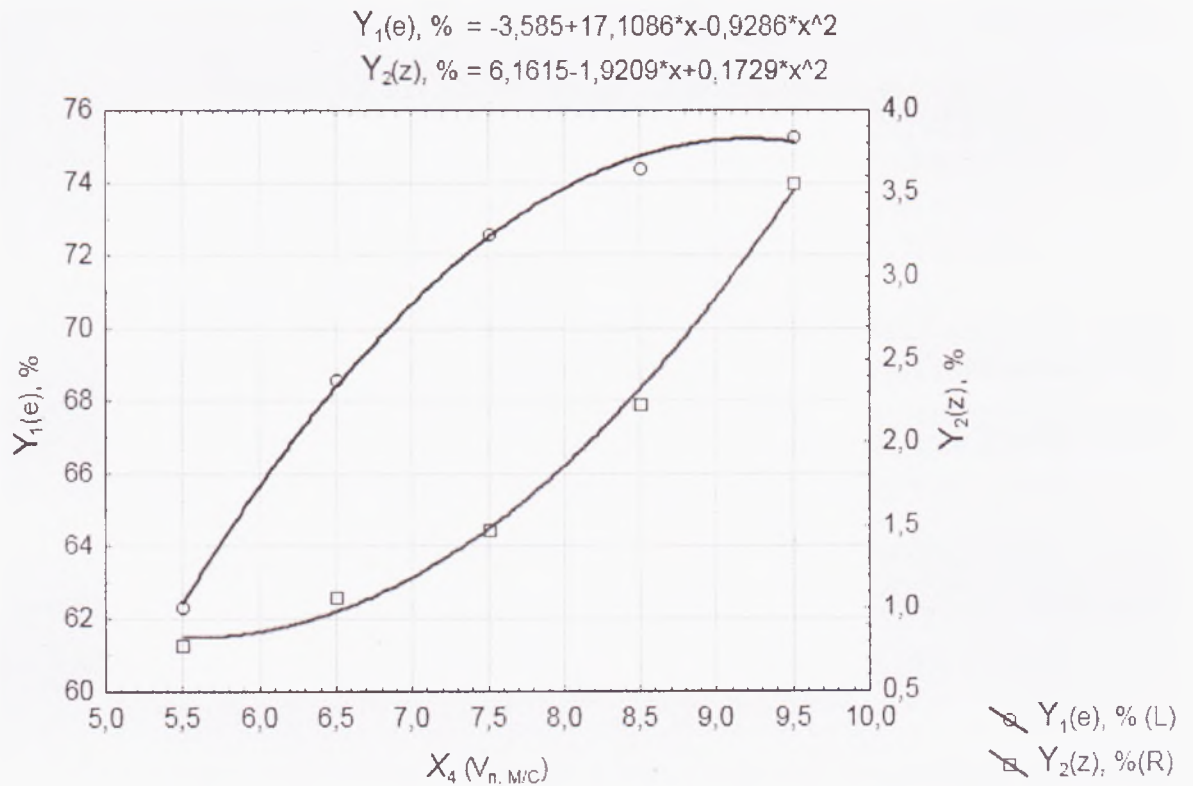


Рис. 15. Вплив швидкості повітряного потоку $x_4 (V_n)$, м/с на повноту розділення Y_1 та чіткість сепарації Y_2

На основі аналізу графічних залежностей можна стверджувати, що збільшення глибини каналу C та середньої швидкості повітряного потоку V_n позитивно впливає на повноту розділення ε , але після досягнення певних значень цих величин спостерігається збільшення виносу повноцінного зерна в відходи. Область раціональних значень середньої швидкості знаходиться в межах $V_n = 7,5 \dots 8$ м/с. При цьому, інтервал раціональних значень глибини каналу C , при якій забезпечується найбільше значення повноти розділення при питомому навантаженні $q_{bi} = 280 \dots 320$ кг·дм/год., знаходиться в межах $C = 100 \dots 110$ мм.

Для досягнення повноти розділення зернового матеріалу $\varepsilon = 70 \dots 75\%$ та мінімальних втратах зерна в відходах $z \leq 2\%$, область раціональних значень кількості задіяних рівнів живильного пристрою знаходиться в межах $n = 4 \dots 6$ шт. для питомих навантажень $q_{bi} = 250 \dots 300$ кг/дм·год.

Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження дозволяють стверджувати, що застосування нової конструкції живильного пристрою ПСК дозволяє підвищити якість пневмосепарації зерна в порівнянні з аналогами.
2. Для забезпечення раціональної швидкості введення зерна в ПСК $v_e = 0,5 \dots 0,6$ м/с, параметри напрямних кривих живильника повинні мати наступні значення: довжина розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, кут її нахилу $\alpha = 33^\circ$, радіус дуги криволінійної ділянки $r = 0,15$ м.
3. Визначено, що найвищі показники якості очищення отримані при середній швидкості повітряного потоку $V_n = 7,5 \dots 8$ м/с. При цьому для забезпечення мінімальних втрат зерна в відходах $z \leq 2\%$, значення глибини каналу повинно бути в межах $C = 100 \dots 110$ мм.
4. Встановлено, що кількість рівнів n і питома подача на рівень живильника q_{bi} є взаємозалежними факторами, при цьому, для отримання повноти розділення зернового матеріалу $\varepsilon \geq 70\%$ та мінімальних втратах зерна в відходах $z \leq 2\%$, область раціональних значень кількості задіяних рівнів живильного пристрою знаходиться в межах $n = 4 \dots 6$ шт.

Список використаних джерел

1. Котов Б.І. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, М.Г. Пастушенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2003. Вип. 33. С. 53-59.
2. Бабченко В.Д. Высокопроизводительные машины для очистки зерна / В.Д. Бабченко, А.М. Корн, А.С. Матвеев. М.: ВНИИТЭИСХ, 1982. 50 с.
3. Ямпиров С. С. Технологии и технические средства для очистки зерна с использованием сил гравитации / С. С. Ямпиров, Ж. Б. Цыбенков. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2006. 167 с.
4. Бурков А.И., Сычугов Н.П. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 2000. 261 с.
5. Проспект фирмы «Petkus». Машины предварительной и интенсивной очистки К-527, К-526, К-560.
6. Нестеренко О.В., Ланецкий С.А., Маркідов П.О. Дослідження режимів руху зерна по напрямній гравітаційній кривій // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с-г техніки: Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 93–95.
7. Хамуев В.Г. Интенсивность выделения легкой примеси в вертикально восходящем воздушном потоке // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. №5. С. 12-16.
8. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.
9. Демский А.Д., Борискин М.А., Лесик Ю.А. Исследование пневмосеперирующих устройств зерновых сепараторов // Тр. ВНИЭКИ продмаш. 1970. №21. С. 49-54.
10. Кожуховский И.Э. Зерноочистительные машины. М.: Машиностроение, 1965. 220 с.

11. Матвеев А.С. К выбору формы сечения пневмосепарирующего канала // Тракторы и сельхозмашины. 1971. №9. С. 26-28.
12. Туров А.К. Пневмосепаратор зерна с предварительной подготовкой в плоско-параллельном воздушном поле // Сибю вес. с.-х. науки. 1984. №2. С.86-90.
13. Ковриков И.Т., Тавтилов И.Ш. Направления исследований и конструирования питателей для сепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке. // Вестник ОГУ. 2003. №7. С. 198-201.
14. А.с. 1542636 СССР, МКИ5 В07В 4/00. Пневмосепаратор / Н.П. Сычугов, Ю.П. Полунин, Н.И. Грабельковский, А.И. Бурков, В.Е. Сайтов (СССР). № 4300013/29-03; заявл. 24.08.88; опубл. 15.02.90, Бюл. № 6. 3 с.
15. Пат. 18241 Рос. Федерация, МПК7 В07В 4/00. Пневмосепаратор / Сайтов В.Е.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. № 2000131140/20; заявл. 13.12.00; опубл. 10.06.01. Бюл. № 16. 1 с.
16. Пат. 2153401 Рос. Федерация, МПК7 В07В 4/02, В07В 11/06. Пневмосепаратор / Болотов А.К., Сайтов В.Е., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. № 99111010/03; заявл. 25.05.99; опубл. 27.07.2000, Бюл. № 21. 4 с.
17. Демский А.Г. Основные направления совершенствования пневмосепарирующего зерноочистительного оборудования / А.Г. Демский, В.Ф. Веденьев. М.: ЦНИИТЭИ легпищемаш., 1978. 73 с.
18. Пат. 2223829 Рос. Федерация, МПК7 В07В 11/06, В07В 4/02. Пневм. сепаратор / Сайтов В.Е., Бурков А.И., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2002108084/03; заявл. 29.03.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. 5 с.
19. А.с. СССР №1165496, МКИ В 07 В 4/00. Пневмосепаратор / Корн А.М., Матвеев А.С., Зюлин А.С., Иванов Д.Л., Кремнев А.Н., Гехтман А.А., Хазанова Т.Д., Панкратов Н.К. №3616436/29-03 ; Заявл. 30.06.83; Опубл. 07.07.1985, Бюл. №25.
20. Ковриков И.Т. Обоснование конструктивных параметров устройств ввода зерна пневмосепараторов / И. Т. Ковриков, И. Ш. Тавтилов //

Общероссийская конференция молодых ученых «Пищевые технологии». Казань: Издательство КГТУ, 2006. С. 58-59.

21. Пат. 9586А Україна, МПК В 02 В 1/00. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна). № а200500209; Заявл. 10.01.05; Опубл. 17.10.2005. Бюл. №10.
22. Пат. 8058А Україна, МПК В 02В1/00. Повітряний сепаратор. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Нестеренко О.В. (Україна).- № u200500190; Заявл. 10.01.05; Опубл. 15.07.2005. Бюл. №7.
23. Васильковський М.І. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М.І. Васильковський О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Кіровоград, 2006. Вип.17. С. 44–48.
24. Нестеренко О.В. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна / О.В. Нестеренко, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка. Технічні науки. Харків, 2015. Вип. 156. С. 35–42.
25. Нестеренко О.В. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна / О. В. Нестеренко, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.: ред.-вид. відділ ЛНТУ. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151.
26. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев, 1960. 286 с.
27. Петренко М.М. Основи наукових досліджень в сільськогосподарському машинобудуванні. Кіровоград: Кіровоградське державне видавництво, 1997. 148 с.
28. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. М.: Горячая линия - Телеком, 2013. 288 с.

29. Wessel I. Vergleichende Untersuchungen Schwerkraftsichtern. // Grundlagen der Landtechnik, 1963. H.18., S. 27-25.
30. Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I., Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. Research in Agricultural Engineering. 2016. Vol.62, pp.56-63.
31. Panasiewicz M., Zawiański K., Kusińska E., Sobczak P., Purification and separation of loose materials in pneumatic system with vertical air stream. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. 2008. Vol.8, pp.171-176.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Моделювання руху зернової частки по направляючій поверхні живильного пристрою

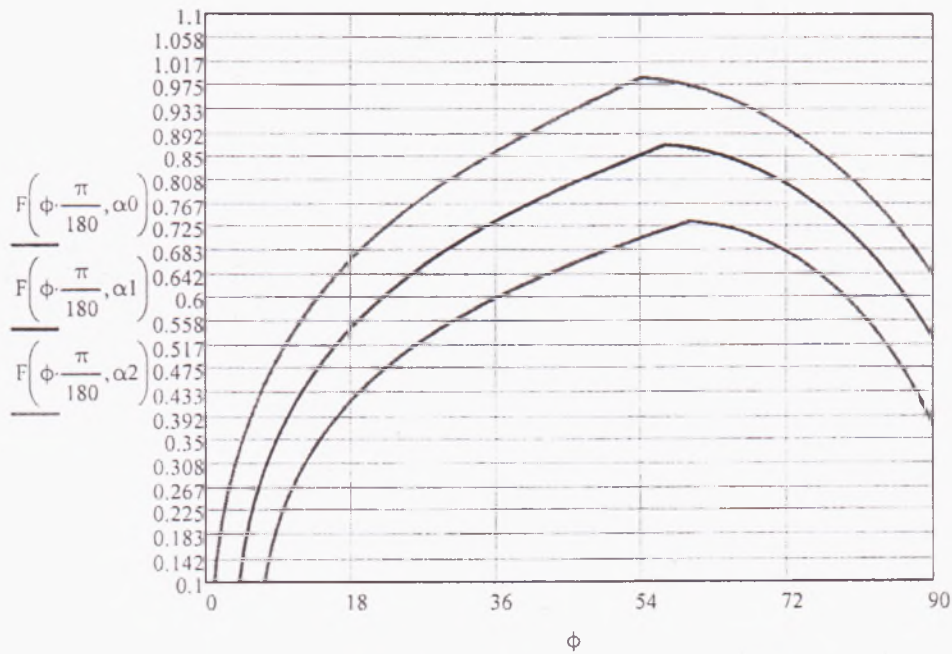
$$L_p := 0.2 \quad g := 9.8 \quad v_0 := 0.05 \quad r := 0.15 \quad f := 0.42$$

$$F(\phi, \alpha) := \begin{cases} \left[2 \cdot g \cdot \left(L_p - r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \phi\right) \right) \cdot (\sin(\alpha) - f \cdot \cos(\alpha)) + v_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} & \text{if } \phi \leq \frac{\pi}{2} - \alpha \\ \left[2 \cdot g \cdot L_p \cdot (\sin(\alpha) - f \cdot \cos(\alpha)) + v_0^2 \right] \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)} + \frac{2 \cdot g \cdot r}{1 + 4 \cdot f^2} \cdot \left[3f \cdot \cos(\phi) + \right. \\ \left. + (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \sin(\phi) - [3f \cdot \sin(\alpha) + (1 - 2 \cdot f^2) \cdot \cos(\alpha)] \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2} \right)} \right] & \text{if } \phi > \frac{\pi}{2} - \alpha \end{cases}$$

$$\alpha_0 := 30 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi_0 := \frac{\pi}{2} - \alpha_0 - \operatorname{atan}\left(\frac{L_p}{r}\right) \quad \phi_0 \cdot \frac{180}{\pi} = 6.87$$

$$\alpha_1 := 33 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi_{01} := \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \operatorname{atan}\left(\frac{L_p}{r}\right) \quad \phi_{01} \cdot \frac{180}{\pi} = 3.87$$

$$\alpha_2 := 36 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \phi_{02} := \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \operatorname{atan}\left(\frac{L_p}{r}\right) \quad \phi_{02} \cdot \frac{180}{\pi} = 0.87$$

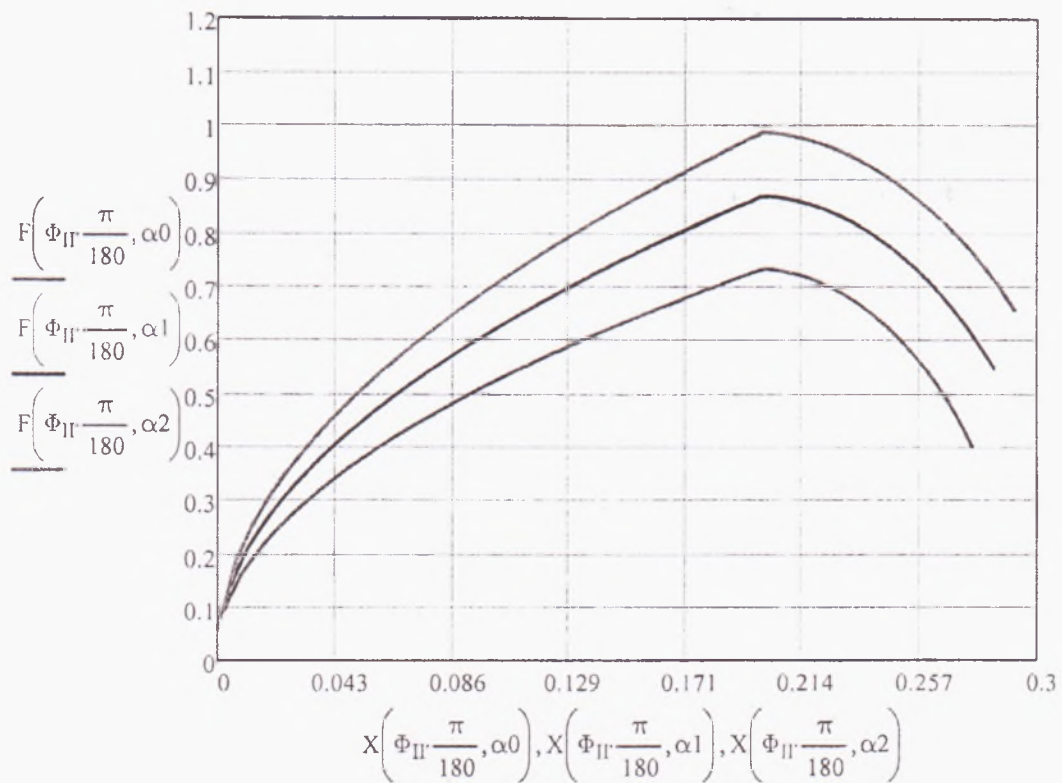


Залежність швидкості від пройденого шляху

$$X(\phi, \alpha) := \begin{cases} \phi_0 \leftarrow \frac{\pi}{2} - \alpha - \operatorname{atan}\left(\frac{Lp}{r}\right) \\ 0 & \text{if } \phi \leq \phi_0 \\ \sqrt{Lp^2 + r^2} \cdot \frac{\sin(\phi - \phi_0)}{\sin(\phi + \alpha)} & \text{if } \phi_0 < \phi \leq \frac{\pi}{2} - \alpha \\ Lp + r \cdot \left(\phi + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) & \text{if } \phi > \frac{\pi}{2} - \alpha \end{cases}$$

$$\Pi := 1..100$$

$$\Phi_{\Pi} := \frac{90}{100} \cdot (\Pi - 1)$$



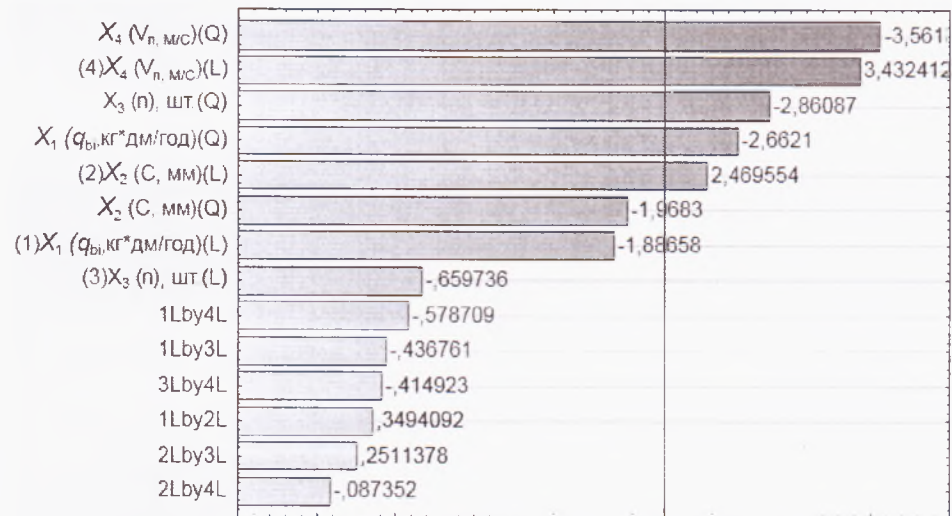
ДОДАТОК 2

Результати реалізації матриці планування експерименту 2^4 +зіркові точки

Номер досліджу	Питоме навантаження на 1 рівень q_{bi} , кг/дм·год x_1	Швидкість введення зерна в ПСК $v_{в}$, м/с x_2	Глибина каналу, С, мм x_3	Відстань між рівнями $h_{м.р.}$, мм x_4	Рівномірність поля швидкостей, δ , % (Y)
1	2	3	4	5	6
1	300	0,7	120	25	19,86
2	300	0,7	120	45	18,28
3	300	0,3	120	25	29,64
4	300	0,3	120	45	27,45
5	300	0,7	80	25	18,55
6	300	0,7	80	45	17,48
7	300	0,3	80	25	26,86
8	300	0,3	80	45	24,52
9	500	0,7	120	25	32,48
10	500	0,7	120	45	29,91
11	500	0,3	120	25	43,62
12	500	0,3	120	45	42,74
13	500	0,7	80	25	30,15
14	500	0,7	80	45	28,84
15	500	0,3	80	25	30,38
16	500	0,3	80	45	29,14
17	160	0,5	100	35	22,61
18	640	0,5	100	35	28,27
19	400	0,1	100	35	35,73
20	400	0,9	100	35	20,06
21	400	0,5	52	35	24,89
22	400	0,5	148	35	32,77
23	400	0,5	100	11	34,96
24	400	0,5	100	58	25,53
25	400	0,5	100	35	18,42
26	400	0,5	100	35	19,78

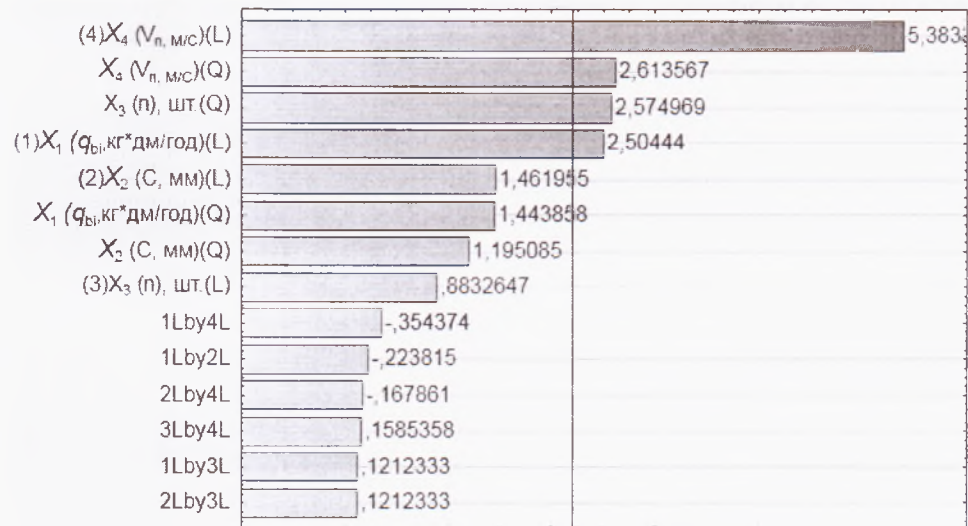
ДОДАТОК 3

Парето-карти для визначення межі статистичного значення коефіцієнту математичного чекання



$\alpha = 0,05$

для повноти розділення зернового матеріалу $Y_1(\varepsilon), \%$.



$\alpha = 0,05$

для чіткості сепарації $Y_2(z), \%$.