

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Допущений до захисту:
завідувач кафедри
Гуцько Ірина Василівна

«___» _____ 2022 р.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

Виконав: студент групи 71-Аі
Сабатин В'ячеслав Сергійович

Керівник: д.т.н., професор
Булгаков Володимир Михайлович

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Затверджую:
завідувач кафедри
Гулько І.В.

_____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту Сабатину В'ячеславу Сергійовичу

на тему:

«Підвищення ефективності функціонування пневмосепаратора зернового
вороху»

затверджену наказом від «21» лютого 2022 р. № 19-м

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТЕІ, тощо).
5. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1-2		
Вступ		2-5		
РОЗДІЛ 1	СТАН ПИТАННЯ РОЗДІЛЕННЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ	20-35		
РОЗДІЛ 2	ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ	20-35		
РОЗДІЛ 3	ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	20-25		
РОЗДІЛ 4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	10-15		
Загальні висновки		1-2		
Список використаних джерел		2-4		

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту

" ____ " _____ 2022 р.

Завдання видав керівник " ____ " _____ 2022 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ РОЗДІЛЕННЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ.....	10
1.1 Аналіз способів визначення пористості сипкого шару.....	10
1.2 Аналіз системи управління подачею матеріалу та повітря, що використовуються в пневмосепараторі	15
1.3 Аналіз існуючих способів контролю та забезпечення заданої пористості шару сипкого матеріалу	21
1.4 Аналіз можливості використання ультразвукових хвиль для контролю та управління технологічними процесами у сільському господарстві.....	25
1.5 Висновки до першого розділу.....	34
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ	35
2.1 Теоретичне обґрунтування параметрів ультразвукових далекомірів та їх розміщення у пневмосепараторі	35
2.2 Обґрунтування принципу роботи пристрою оперативного контролю та підтримки шару зернового вороху в заданому стані	39
2.3 Розробка алгоритму роботи пристрою оперативного контролю та підтримки шару зернового вороху в заданому стані	43
2.4 Теоретичні передумови забезпечення якісної оцінки очищеного зернового вороху за допомогою розробленого пристрою	47
2.5 Висновки до другого розділу.....	52

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	54
3.1 Програма наукового дослідження	54
3.2 Вимірювальні прилади наукового дослідження	54
3.3 Методика збору даних для статистичного аналізу числових рядів, отриманих від ультразвукових далекомірів	60
3.4 Методика визначення впливу періодичності опитування ультразвукових далекомірів на якість оцінки пористості шару зернового вороху.....	62
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	64
4.1 Результати статистичного аналізу рядів, отриманих від ультразвукових далекомірів.....	64
4.2 Результати кореляційно-спектрального аналізу випадкового процесу зміни пористості зернового вороху	67
4.3 Техніко-економічна ефективність.....	71
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	73
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

АНОТАЦІЯ

Сабатин В.С. – Підвищення ефективності функціонування пневмосепаратора зернового вороху. – Рукопис.

Робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 Агроінженерія. – Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця, 2022.

В магістерській роботі розроблено спосіб контролю та забезпечення заданого псевдозрідження шару зернового вороху за характером зміни зміни шару зернового вороху у процесі його очищення. Розроблено алгоритм роботи та конструкція пристрою оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку. Кореляційно-спектральний аналіз випадкового процесу псевдозрідження зернового вороху показав, що в ньому присутні приховані регулярні періодичні складові.

Пневмосепаратор з вбудованим пристроєм оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку дозволяє якісно очищати зерно, що надходить на обробку, протягом усього періоду роботи, що виключає необхідність повторної обробки в умовах постійно змінюючих характеристик шару зернового вороху.

Ключові слова: пневмосепаратор, зерновий ворох, ультразвук, кореляційно-спектральний аналіз, активна потужність, тонкодисперсний матеріал.

ANNOTATION

Sabatyn V.S. – Increasing the efficiency of the pneumatic grain pile separator. – Manuscript.

Work to obtain a master's degree in 208 Agricultural Engineering. – Vinnytsia National Agrarian University. – Vinnytsia, 2022.

In the master's thesis, a method of controlling and ensuring the specified fluidization of the grain pile layer was developed according to the nature of the change of the grain pile layer during its cleaning. The algorithm of operation and the design of the device for operational control and maintenance in a given state of a layer of a moving grain pile with the help of ultrasound have been developed. Correlation-spectral analysis of the random process of fluidization of a grain pile showed that there are hidden regular periodic components in it.

The pneumatic separator with a built-in device for operational control and maintenance of the moving grain heap layer in a given state, using ultrasound, allows for high-quality cleaning of the grain entering the processing during the entire period of operation, which eliminates the need for re-processing in conditions of constantly changing characteristics of the grain heap layer.

Keywords: pneumatic separator, grain heap, ultrasound, correlation-spectral analysis, active power, finely dispersed material.

ВСТУП

Одним із головних завдань для сільського господарства є збільшення виробництва продовольчого та фуражного зерна, щоб мати необхідні обсяги та ресурси для експорту [1].

Важливим елементом обробітку та виробництва зерна є його післязбиральна обробка, що становить до 40% у структурі собівартості. Своєчасна та якісна післязбиральна обробка – важливий резерв збільшення збирання зерна [5].

При післязбиральній обробці зерна застосовують машини для попереднього, первинного, вторинного очищення та сортування, більшість яких забезпечені пневмосепаруючими системами або виконані у вигляді самостійних машин.

Зерновий ворох, що надходить на післязбиральну обробку, є сумішшю цілого, щуплого і пошкодженого зерна (насіння) основної культури, насіння різних культурних і бур'янів. Також зернова купа містить домішки органічного – частки рослин, соломи, колосків, стерні, та мінерального – пісок, грудочки землі та ін., походження.

У процесі обробки зерновий та насінневий матеріал доводять до необхідних норм, які відображені у спеціальних нормативно-технічних державних стандартах.

При поділі зернового вороху на фракції найбільшого поширення набув спосіб сепарування зернових сумішей у вертикальному повітряному потоці – пневмосепаруючому каналі (ПСК) через конструкційну простоту і компактність пристрою.

При роботі більшості зерноочисних машин подача повітря і матеріалу ПСК здійснюється оператором вручну [7]. Однак при стохастичній зміні властивостей потоку матеріалу оператор не в змозі оперативно реагувати за пульсацією повітря та змінами властивостей матеріалу під час роботи потокової лінії.

Для зниження трудовитрат на управління в даний час виробники починають застосовувати різні системи підтримки швидкості повітря в ПСК. Головним їх недоліком є можливість коригування подачі повітря в шар при зміні структури шару оброблюваного матеріалу, яка істотно впливає на якість поділу

багатокомпонентної суміші.

Відсутність способу оперативного контролю за станом шару, що сепарується, в ПСК і підтримки його стану неминуче призводить до зниження продуктивності очищувача і ефективності очищення зернових сумішей.

Мета досліджень – зниження витрат і забезпечення якісного поділу зернового вороху за характеристиками, що змінюються, в пневмосепараторі зі змінною опорною сіткою.

Виходячи з поставленої мети, необхідно вирішити такі завдання дослідження:

– розробити спосіб управління шаром зернового вороху та подачами повітря та зернового вороху в пневмосепаруючий канал;

– розробити алгоритм роботи та конструкцію пристрою оперативного контролю та підтримки заданої товщини шару зернового вороху, що рухається, на основі нового способу;

– провести експериментальні дослідження та обґрунтувати параметри функціонування розробленого ультразвукового пристрою оперативного контролю та підтримки заданої товщини шару зернового вороху.

Об'єкт дослідження – технологічний процес роботи пневмосепаратора, оснащеного пристроєм оперативного контролю.

Предмет дослідження – параметри пристрою оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено алгоритм роботи та пристрої оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку;

- обґрунтовано параметри ультразвукового пристрою оперативного контролю та забезпечення заданої товщини шару зернового вороху, що рухається.;

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ РОЗДІЛЕННЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ

1.1 Аналіз способів визначення пористості сипкого шару

Визначення стану шару матеріалу відіграє важливу роль при моделюванні та вивченні процесів поділу на компоненти сипких матеріалів. Пористість вплине на плинність сипкої маси, протікання процесу вентилявання шару, сепарації, поділу по шарах. Математично визначення пористості можна представити наступним чином:

$$\Pi = \frac{V_n}{V_0}, \quad (1)$$

де V_n – об'єм пор в матеріалі;

V_0 – об'єм матеріалу в звичайному стані [12].

Існує велика кількість методів визначення частки обсягу порожнин у загальному обсязі шару матеріалу. Вибір методу визначення стану шару залежить від виду досліджуваного матеріалу, допустимої похибки визначення пористості шару та області застосування досліджуваного показника. Найбільш простим і найпоширенішим способом експериментального визначення об'єму порожнин у зернистому шарі є заповнення їх рідиною. Об'єм пористих елементів шару можна визначити зануренням зерен у рідину в тому випадку, якщо остання не входить у пори зерен. Для цього необхідно виконання однієї з наступних умов: пори попередньо повинні бути залиті рідиною; поверхня елементів повинна мати різко гідрофобні властивості, що перешкоджають проникненню рідини у пори зерен; поверхневий натяг рідини повинен бути досить великим, щоб вона не проникала в пори [13]. Високий поверхневий натяг має ртуть [13, 14, 15]. Визначення пористості шару за допомогою ртуті небажане через токсичність останньої. У разі, якщо поверхня досліджуваних елементів має гідрофобні властивості, можна застосовувати метод визначення пористості об'єктів водою, строго враховуючи її кількість [16, 17].

Визначення пористості шару за допомогою методу зважування дозволяє забезпечити високу точність – 99...99,5%. Висушений зразок зважують, вакуумують і насичують рідиною, що змочує зразок, але не взаємодіє з ним. Потім випробуваний зразок занурюють у рідині, що насичує. На підставі проведених зважувань та значення істинної густини матеріалу, визначеної за ДСТУ 2211, обчислюють пористість [18, 19]. Представлені методи не знайшли широкого застосування в промисловості, так як у багатьох галузях вплив вологи на досліджуваний матеріал може призвести до зміни його фізико-механічних властивостей та вплинути на його збереження. Наявність бульбашок повітря у воді знижує об'єм рідини і, як наслідок, збільшує похибку у вимірі. Також до недоліків зазначених методів можна віднести те, що на умови псевдозрідження вологість істотно впливає. У разі гігроскопічних частинок надмірне зволоження призводить до їх злипання та агрегування [20, 21]. При цьому погіршується сипкість матеріалу і, як наслідок, знижується його пористість. З технологічної точки зору використання даного методу при обробці зерна неможливо.

Подібним з рідинним методом є спосіб визначення пористості за допомогою річкового піску. Метод застосовується для визначення пористості елементів шару розміром 5 мм і більше [21]. Недоліком цього методу є те, що вологий пісок може зволожити зерно, що вплине на його збереження. Даний спосіб неможливо застосувати для визначення пористості шару в потоці, так як при обробці шару повітряним потоком відбудеться поділ піску від зернової маси.

Радіоізотопний метод визначення пористості [23, 24] заснований на ослабленні γ -випромінювання при проходженні через зернистий шар. Локальну пористість визначають по ослабленню інтенсивності пучка γ -випромінювання, що направляється горизонтально паралельними хордами, що стосуються вертикальних коаксіальних циліндрів [25]. Недоліком даного методу є радіоактивний вплив на персонал, що обслуговується, і досліджуваний матеріал.

У роботах [24, 25] представлений спосіб визначення пористості сипкого матеріалу з аеродинамічного опору шару. Зазначається, що при фонтануванні шару досліджуваного матеріалу його опір зі збільшенням швидкості повітряного потоку

змінюється незначно. Основним недоліком представленого способу визначення пористості є те, що аеродинамічний опір зернового шару залежить від складу, виду та вологості вороху, які стахостично змінюються. Зважені в потоці частинки вороху киплячого шару безперервно перемішуються один з одним. При цьому постійно змінюються і проміжки між сусідніми частинками, їх локальний опір потоку, поле швидкостей якого стає нестационарним.

Авторами Зімінім Є.М., Волхоновим М.С. та ін. вивчалось питання про визначення стану та пористості шару сипких матеріалів за допомогою установки для визначення висоти та ступеня псевдозрідження зернового шару (рис. 1.1).

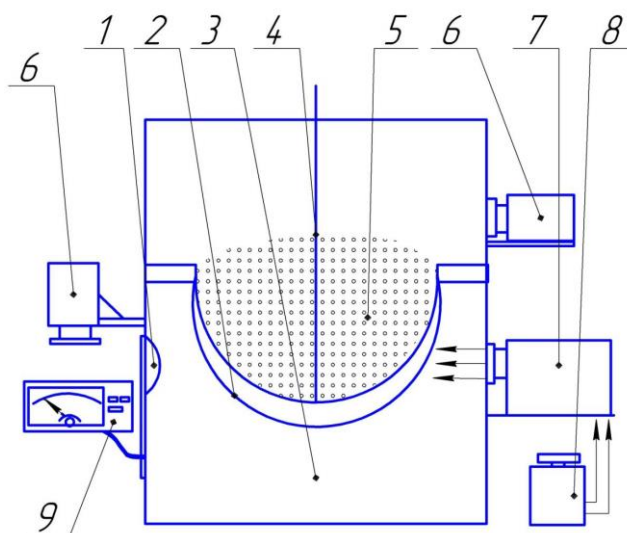


Рис. 1.1 - Установка для дослідження аеродинамічного опору сипких та поганосипких сільськогосподарських матеріалів: 1 – фотоприймач; 2 – прозорі лопатки аерожолоба; 3 – повітророзподільний канал аерожолоба; 4 – лінійка; 5 – зерновий шар; 6 – відеокамери; 7 – джерело світла; 8 – лабораторний автотрансформатор; 9 – люксометр

Для оцінки стану і структури псевдозрідженого зернового шару пропонується експрес-метод, в основі якого закладено фіксування структури шару, що змінюється фотоприймачем шляхом вимірювання інтенсивності хвильового потоку, що пронизує зерновий шар від джерела світла. Недоліком зазначеної установки є те, що використовується видимий спектр хвиль, тому цю систему складно застосувати в пневматичному каналі зерноочисника через високий вміст

пилу всередині установки під час обробки матеріалу.

Лазерний спектрометр (рис. 1.2) використовується для експресного спектрального аналізу струмопровідних зразків, аналізу елементного складу твердих монолітів, таких як скло, кераміка, пластмаси, граніти і т. д.; різних порошків, включаючи ґрунти, породи, геологічні зразки тощо. Спектрометр може бути застосований для мікроаналізу неоднорідних зразків як по поверхні, так і по глибині, а також для аналізу мікрозразків, зразків складної форми. Аналізований спектр виходить шляхом реєстрації флуоресценції після впливу на досліджувану речовину лазерним випромінюванням. Основний недолік цього методу полягає в тому, що необхідно розбавляти пульпу водою до 1% вмісту твердої речовини, щоб промені проникали через весь потік, інакше результати будуть неправдоподібними.

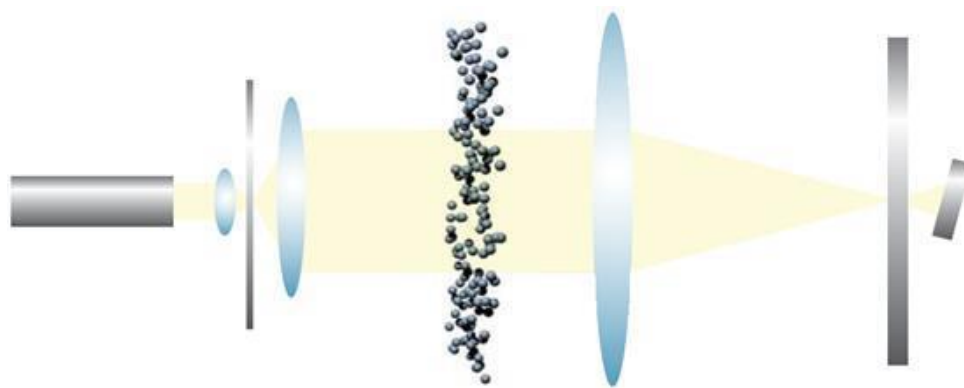


Рис. 1.2 - Схема лазерного спектрометра

Для обчислення розподілу частинок за розмірами використовують електроакустичний спектрометр (рис. 1.3) [2, 3]. Принцип дії ультразвукового приладу полягає в тому, що при проходженні через суспензію частково поглинаються звукові хвилі, спричиняючи незворотні втрати енергії внаслідок тертя, теплопровідності та випромінювання. На відміну від оптичних методів, таких як динамічне світлорозсіювання, лазерна дифракція, застосування ультразвуку дозволяє уникнути ряду факторів, що заважають при дослідженні концентрованих суспензій і емульсій: високе поглинання випромінювання в непрозорих зразках, виникнення заважає явища багаторазового розсіювання світла, спотворює.

Прилад Dispersion DT-1202 поєднує можливості всього спектра акустичних методів дослідження дисперсних систем. Прилад використовує метод вимірювання спектра акустичного згасання та швидкості звуку в середовищі шляхом зондування зразка високочастотними ультразвуковими імпульсами дуже малої інтенсивності.

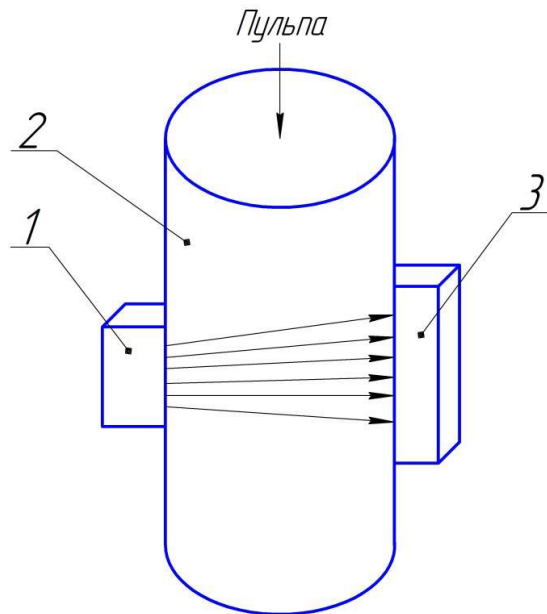


Рис. 1.3 - Акустичний спектрометр: 1 – джерело ультразвуку; 2 – пульпопровід; 3 – приймач ультразвукових хвиль

Повну картину розподілу частинок за крупністю приладу дозволяє зробити таке явище як дифракція звукових хвиль.

Приклад, який показує, як працює прилад, що використовує дифракцію звукових хвиль на великих і дрібних частинках, представлений рисунку 1.4.

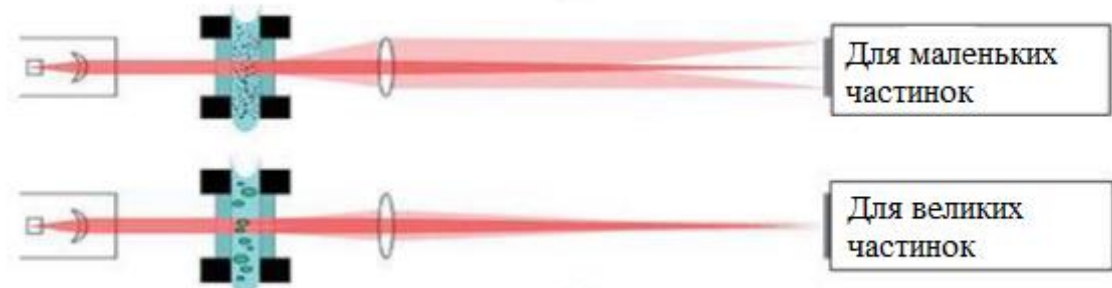


Рис. 1.4 - Дифракція звукових хвиль на великих і маленьких частинках

Звукові хвилі проходять через зразок з матеріалом, у верхній частині рисунка представлений зразок з частинками менше 1 мм, а в нижній більше 1 мм, в

результаті дифракції відбувається обгинання хвиль перешкод, спотворені хвилі реєструються та обробляються ЕОМ. Внаслідок чого отримують гранулометричну характеристику. Основний недолік даного приладу – це складність конструкції та його висока вартість.

Аналізуючи представлені методи, можна дійти невтішного висновку, що визначення пористості досліджуваного шару актуально у багатьох галузях промисловості. Вибір методу залежить від умов, які необхідно дотримати, щоб при визначенні стану шару не вплинути на фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу, зберігши при цьому високу точність. При визначенні пористості зернового шару в пневмосепаруючому каналі найбільш раціональне застосування ультразвукового способу. Залишається невирішеною задача підтримання заданих параметрів стану зернового шару.

1.2 Аналіз системи управління подачею матеріалу та повітря, що використовуються в пневмосепараторі

Незважаючи на появу останніми роками сепараторів, які працюють на нових принципах, пневмосепаратори залишаються широко затребуваними.

В результаті подібних досліджень визначено: теоретично можливий аеродинамічний поділ насіння гранату від гранатової шкірки з місцевими перегородками, якщо значення швидкості повітря регулюється відповідно до граничної швидкості гранатової шкірки [8]. У роботі [9] наведено результати досліджень сепарації борошна у пневматичному гвинтовому сепараторі (рис. 1.5).

Виробничі випробування та експлуатація прототипу сепаратора показали, що загальний коефіцієнт вилучення необхідних фракцій $\approx 92\%$.

При поділі зернового вороху на фракції найбільшого поширення набув спосіб сепарування зернових сумішей у вертикальному повітряному потоці – пневмосепаруючому каналі через конструкційну простоту і компактність пристрою. Авторами Рензяєвим А.О., Рензяєвим О.П., Сорокопудовим О.Ф. розроблено лабораторну установку (рис. 1.6), оснащену шнековим дозатором, що

дозволяє забезпечувати стабілізацію зернового потоку в сепарувальному каналі та підвищення ефективності процесу поділу.

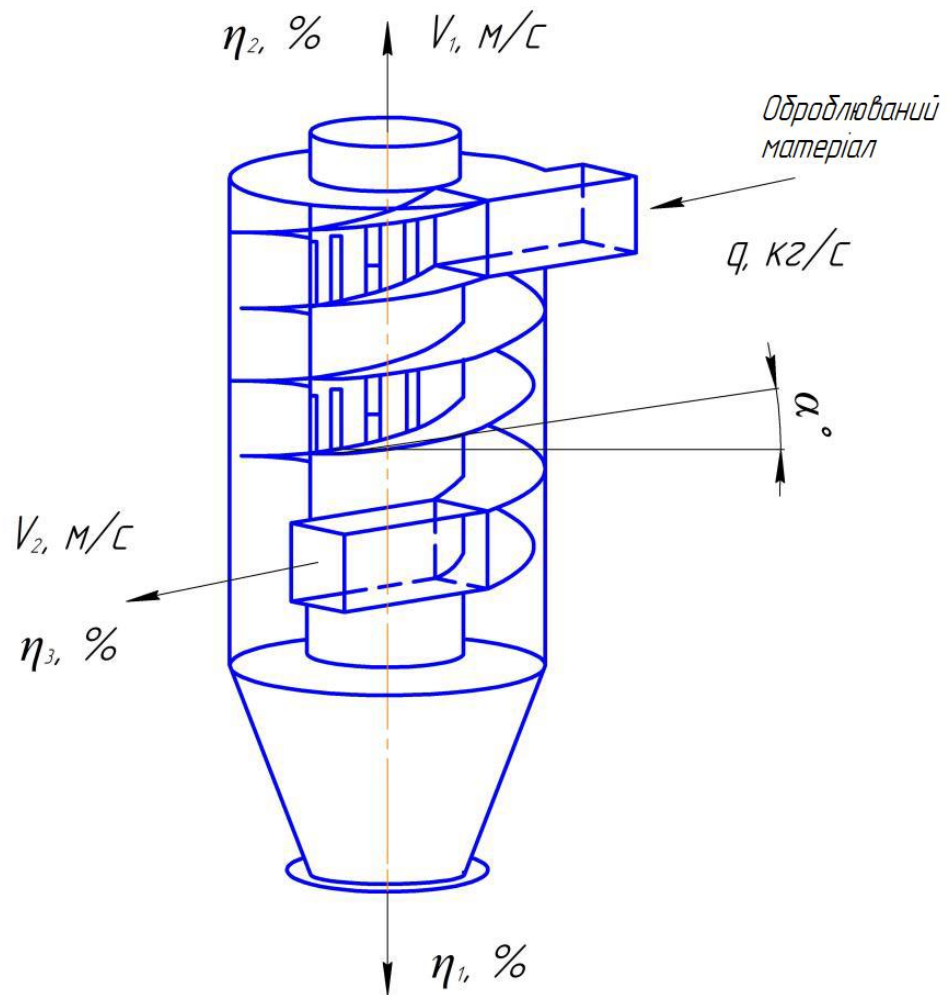


Рис. 1.5 - Пневматичний гвинтовий сепаратор

Пневмосепаратор працює в такий спосіб: зерновий матеріал надходить у завантажувальний бункер, звідки дозатором подається в роздільний канал. Зерновий матеріал накопичується на сітці, що підтримує. Завдяки перегородці, що перешкоджає подальшому руху зерна по ситі, утворюється суміш зернового матеріалу з повітрям. Найбільш важка фракція долає перегородку і зсипається в сепаруючий канал. Більш легка фракція відноситься повітряним потоком і поділяється на фракції в сепаруючому та осаджувальному каналах залежно від швидкості частинок. Відпрацьоване повітря потрапляє до циклону, де відбувається його очищення від пилової фракції [4].

Запропонований пневмосепаратор дозволяє розділити матеріал, що обробляється на 4 фракції.

Швидкість повітря в представлених пневмосепаруючих каналах регулюється зміною частоти обертання електродвигуна вентилятора, подача матеріалу на обробку здійснюється дозаторами, при цьому не враховується характер зміни складу вороху в каналі, що пневмосепарує.

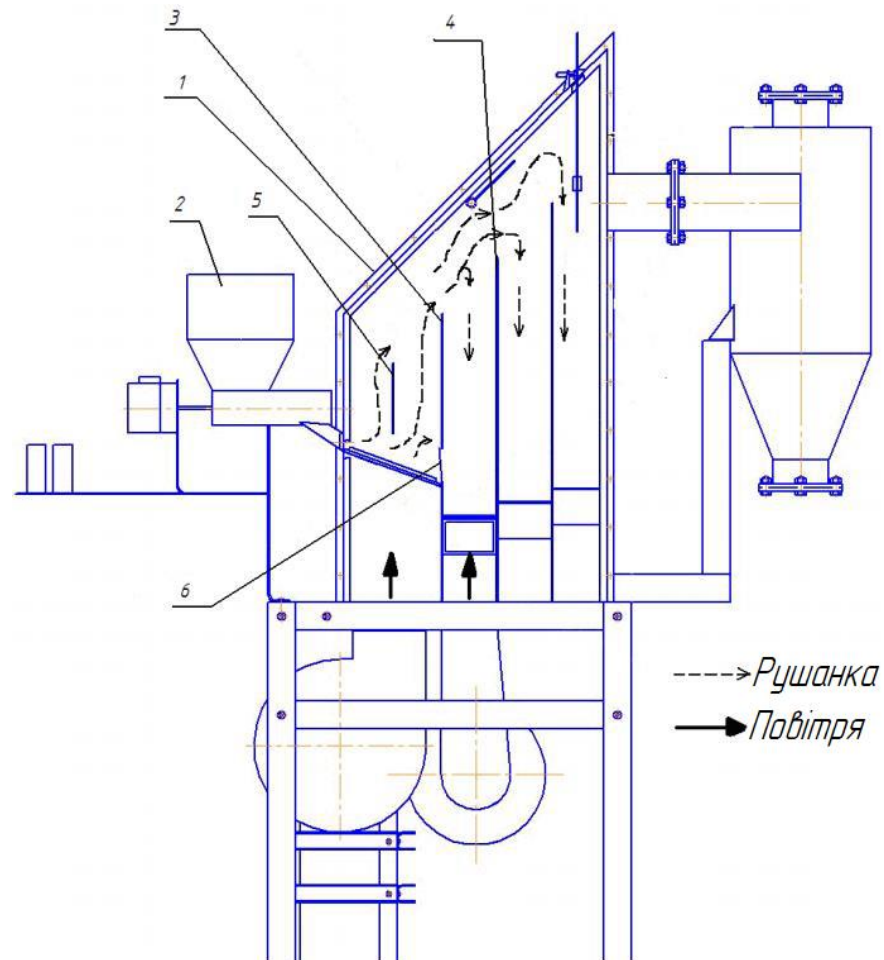


Рис. 1.6 - Схема лабораторно-експериментального пневмосепаратора для поділу зернового матеріалу: 1 – корпус; 2 – шнековий дозатор; 3 – задня стінка сепаруючого каналу; 4 – стінка осаджувального каналу; 5 – бар'єр, що вирівнює зерновий потік; 6 – перегородка

Вивченням питань післязбиральної обробки зерна присвячено роботу Мякіна В.М., Урюпіна С.Г., Кривошеєва А.В. У роботі представлені багатоярусні пневмосепаруючі канали (рис. 1.7).

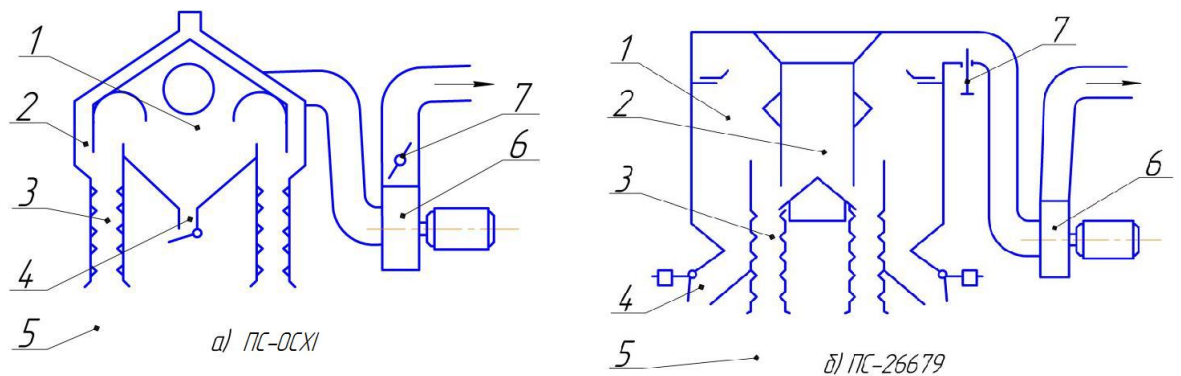


Рис. 1.7 - Принципові схеми пневмосепараторів: а) ПС-ОСХІ; б) ПС-26679
 1 – відстійна камера; 2 – завантажувальний пристрій; 3 – багатоярусний аспіраційний канал; 4 – вихід «легкої» фракції; 5 – вихід «важкої» фракції; 6 – електровентильатор; 7 – регулювальна заслінка

Робочий процес сепараторів протікає в такий спосіб. Матеріал, що надходить в машину зверху, направляється завантажувальними пристроями 2 багатоярусні аспіраційні канали 3. «Легка» фракція піднімається потоком повітря в осадову камеру 1 і виводиться з неї через виходи 4, обладнані повітряно-зерновими клапанами. "Тяжка" фракція опускається і приймачами насіння 5 направляється в бункер насіння. Вертикальний повітряний потік у багатоярусних аспіраційних каналах створюється електровентильатором 6 швидкість повітря в каналах регулюється заслінкою 7.

Застосування фракційного пневмосепаратора СП-2Ф на стадії вторинного очищення дозволяє за один пропуск виділити насіння I та II сорту, що відповідають за чистотою категоріям ОС та РСт. Подача матеріалу в пневмосепаратор встановлюється заслінкою-вібратором пристрою введення 4. Швидкість повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі 3 встановлюється за якістю очищення важкої фракції з урахуванням втрат повноцінного насіння у відходи за допомогою дросельної заслінки 13.

У представлених зерноочисних машинах застосовується ручне регулювання подачі матеріалу та витрати повітря. Зміна властивостей оброблюваного матеріалу під час роботи неминуче викликає зміну всіх змінних стану процесу. Зміна властивостей оброблюваного матеріалу при подачі в ПСК викликає зміну

При роботі потокової лінії також можливі коливання в подачі матеріалу, що очищується в ПСК, при збільшенні кількості матеріалу, що надходить в ПСК, збільшується товщина шару, що продувається, що веде до зниження якості очищення. Мала подача призводить до зниження продуктивності. При роботі ПСК основним завданням є підтримання оптимальної подачі повітря і матеріалу в зону сепарації. Ручний спосіб зміни параметрів роботи систем очищення не дозволяє оперативно реагувати на зміну засміченості зерна, що обробляється.

Один із сучасних способів контролю технологічного процесу очищення зернового вороху розробили Жолобов Н.В. та Маїшев К.В. Принцип роботи пристрою (рис. 1.9) представлений у роботі.

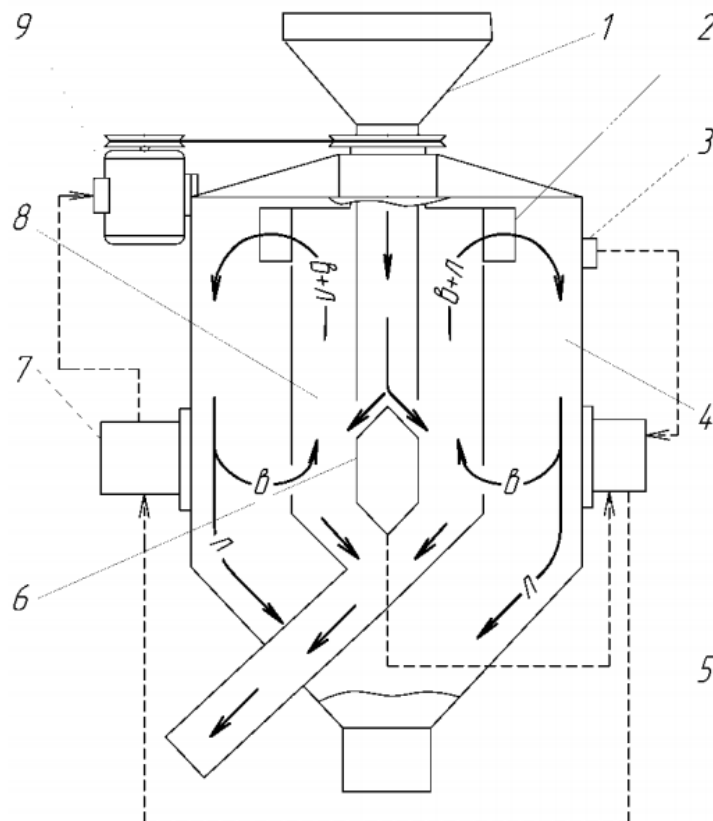


Рис. 1.9 - Схема розміщення пристрою контролю та управління технологічним процесом пневмосепаратора: 1 – приймальний пристрій; 2 – колесо вентилятора; 3 – датчик втрат зерна у відходи; 4 – осаджувальна камера; 5 – базовий блок; 6 – ділянка потоку матеріалу, що очищується, з вмонтованим датчиком витрати зерна; 7 – перетворювач частоти електричного струму; 8 – пневмосепаруючий канал; 9 – асинхронний електродвигун

Для визначення абсолютних втрат матеріалу, що очищається, застосовується датчик, що фіксує зіткнення повноцінного зерна з елементами конструкції. Зіткнення зерен зі сталевими стінками відбувається на високій швидкості, викликаючи характерні звукові імпульси [6]. Значення абсолютних втрат зерна у відходи розраховується з урахуванням аналізу параметрів даного звукового сигналу. Дані з датчика подаються на блок керування, де проводиться їх аналіз і, при необхідності, подається сигнал виконавчого механізму приводу вентилятора для зміни витрати повітря. Запропонований спосіб дозволяє здійснювати автоматичний контроль за швидкістю повітряного потоку. Але не досліджено, як працюватиме система, коли у складі зернового вороху буде присутній бур'ян, який має меншу швидкість щодо швидкості витання зерна. Також у наданій установці не представлена система подачі матеріалу.

1.3 Аналіз існуючих способів контролю та забезпечення заданої пористості шару сипкого матеріалу

Варіантом зниження трудовитрат на управління може бути автоматична підтримка швидкості повітря в ПСК, застосована в зерноочисних машинах [7]. У цих машинах швидкість повітря встановлюється на пульті керування та підтримується постійною автоматично. Однак недоліком цього способу управління є можливість коригування подачі повітря при зміні структури шару оброблюваного матеріалу, яка істотно впливає на якість поділу багатокомпонентної суміші.

Суть способу полягає у впливі магнітного поля на киплячий шар з феромагнітних частинок. Слабке однорідне вертикальне магнітне поле зменшує інтенсивність внутрішніх пульсаційних рухів частинок, не змінюючи закономірностей зовнішньої гідравліки. У сильних полях частинки вишиковуються в ланцюжка вздовж ліній поля, утворюючи своєрідний псевдополімерний шар. Недоліком цього способу є те, що вплив магнітного поля можливий лише на феромагнітні елементи. Застосування способу при обробці зерна неможливо.

Метод зміни пористості досліджуваного матеріалу представлений в роботі [29] (рис. 1.10). Визначено залежність пористості та радіальної швидкості твердої фази від радіальної координати та тимчасового параметра.

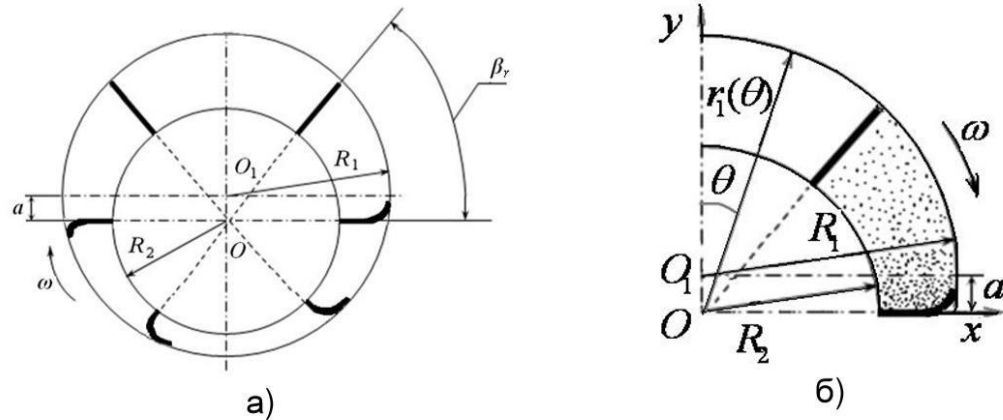


Рис. 1.10 - Схеми для руху тонкодисперсного матеріалу в ротаційному пристрої з гнучкими лопатками: в каналах, що звужуються (а) і в комірці апарату (б)

У пристрої з гнучкими лопатками, що обертаються, показано, що відбувається досить рівномірне ущільнення порошку в каналі описаного апарату. Пропонується змінювати пористість порошку, варіюючи частотою швидкості обертання ротора, а також зміною статора радіуса (R_1). Робота пристрою вивчена на прикладі обробки однорідного тонкодисперсного матеріалу. Не досліджено, яким чином проводитиметься зміна пористості неоднорідного матеріалу. Даний метод неможливо використовувати в машинах післязбиральної обробки матеріалу з технологічної точки зору.

В теорії ґрунтів відомі умови, у яких сипкий матеріал приведений до критичної щільності – пористості, з допомогою методу компресії; наданням частинкам структури вібраційних рухів; докладання рушійної сили. Фізико-механічні властивості зернового шару унеможливають використання цих методів. Впровадження пристроїв для реалізації представлених умов у машинах післязбиральної обробки зерна неможливі з технологічної точки зору.

Вібросхіджений шар матеріалу створюється зміною частоти коливань корпусу установки. Основними недоліками даного способу є те, що в процесі

роботи пристрою виникають знакозмінні навантаження на робочі органи системи, що негативно позначається на їхній довговічності. Коливальні рухи установки будуть безперервно впливати на шар у вигляді ударних навантажень на зерно. За таких умов оболонка зерна може пошкодитися, що вплине на якість обробки матеріалу та його збереження. Також використання запропонованої установки має на увазі високий рівень шуму, що ускладнює роботу обслуговуючого персоналу.

Системи контролю та управління пористості зерен застосовуються у вугільній промисловості на гідравлічних осадкових машинах при збагаченні корисних копалин. У цих системах використовуються датчики поплавця поворотного типу, які повідцем кріпляться до рухомої осі кронштейна і встановлюються на певній висоті над решетом. Сам датчик кутового положення кріпиться до повідку поплавця. Як чутливий елемент використовують інтегральний мікромеханічний акселерометр. Електронна схема датчика забезпечує можливість підстроювання коефіцієнта посилення, частоти зрізу фільтра, підстроювання «нуля». Датчик кутового положення перетворює кут нахилу струмовий сигнал 4-20 мА. Система здійснює автоматичне регулювання та керування подачею води та повітряного потоку в машину. Подібні датчики не можуть бути використані в пневмосепараторах через високу парусність поплавця, що призводить до додаткового аеродинамічного опору системи та нерівномірного розподілу повітряного потоку.

Особливе значення для забезпечення заданого стану зернового шару має використання датчиків для контролю за сепарацією, особливо якщо ці датчики працюють в режимі реального часу і інформація з них оперативно використовується для управління технологічним процесом. Для проведення хімічного аналізу зерна відомі недорогі датчики, які працюють на основі спектрального аналізу. Розроблено подібні датчики для зернових сепараторів, а також для аналізу зернового вороху, що збирається зерновим комбайном. Але залишилися невирішеними завдання, пов'язані з використанням подібних датчиків для роботи в пневмосепаруючих каналах.

Авторами Волхоновим М.С., Смірновим І.А., Полозовим С.А. та ін розроблений спосіб управління станом шару в аеродинамічних системах машин для післязбиральної обробки матеріалу та пристрій для його здійснення (рис. 1.11).

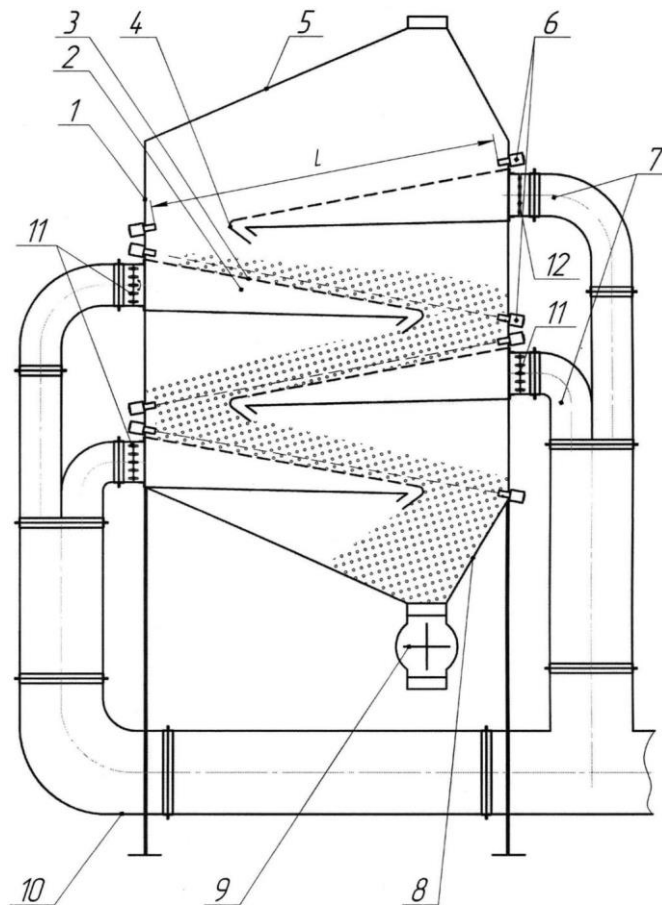


Рис. 1.10 - Аеродинамічна система машини для післязбиральної обробки матеріалу: 1 – шахта; 2 – аеродинамічні коробки; 3 – перфорована перегородка; 4 – активний переливний поріг; 5 –сушильний бункер; 6 – ультразвукові далекоміри; 7 – повітророзподільні коробки; 8 – сушильний бункер; 9 – дозатор; 10 – розподільник; 11 – жалюзійні заслінки; 12 – «жалюзійні заслінки закриті».

Згідно даного способу, регулювання подачі повітря в зерно здійснюється на підставі порівняння довжини шляху ультразвукової хвилі, що пройшла через зерновий шар з певним значенням, яке заздалегідь задається оператором. До недоліків цього способу слід віднести те, що хвиля УЗ пронизує шар у напрямку його руху. З цієї причини якісна оцінка внутрішньої структури зернового шару з фізико-механічними властивостями, що змінюються, в процесі його очищення неможлива.

Розвиток оперативного контролю за станом шару, що сепарується, йде різними шляхами. Традиційні механічні способи очищення в даний час доповнюються потужностями обчислювальних машин штучного інтелекту, наприклад при налаштуванні фотосепараторів використовується машинне навчання [30]. Автори Польського Вармінсько-Мазурського університету у роботі пропонують використовувати генетичні алгоритми для встановлення оптимальних параметрів сепарації насіння гречки. Однак результати цих досліджень не знайшли широкого практичного застосування. Причиною цього, ймовірно, є недостатня вивченість та низька ефективність роботи цих систем.

На підставі вищевикладеного можна зробити наступне узагальнення: на сьогоднішній день не розроблені способи та пристрої оперативного контролю за станом шару, що рухається, зернового вороху при його сепарації. Для цього краще використовувати пристрої, засновані на використанні фізичних властивостей УЗ хвилі, так як вони видають інформацію про продукт в режимі реального часу і точність визначення меншою мірою залежить від багатьох несприятливих факторів - пил та ін., однак існує складність їх застосування в системах стохастичним зміною щільності матеріалу, наприклад, зернового вороху не враховуються розмірні характеристики елементів шару і його «насіпна» щільність, що змінюється.

1.4 Аналіз можливості використання ультразвукових хвиль для контролю та управління технологічними процесами у сільському господарстві

Ультразвук – це пружні коливання середовищі із частотою поза чутності людини. Зазвичай, під ультразвуком розуміють частоти вище 20 000 Герц. У природі ультразвук зустрічається як компонент багатьох природних шумів – в шумі вітру, водоспаду, дощу, в звуках, що супроводжують грозові розряди, і т. д., так і серед звуків тваринного світу. Деякі тварини користуються ультразвуковими хвилями для виявлення перешкод, орієнтування у просторі та спілкування.

При поширенні ультразвукових хвиль можливі явища дифракції, інтерференції, поглинання, відбиття та ін. [31]. Якщо керуватися відповідними

нормативами, ультразвук є досить безпечним і зручним середовищем для наукової та практичної діяльності.

Особливий інтерес становлять перспективні розробки вітчизняних та зарубіжних дослідників та виробників у розглянутих напрямках. Хороші результати показані при використанні ультразвуку в підприємствах, що виробляють тварини та рослинні жири.

При обробці ультразвуком хлібопекарських дріжджів протягом години бродильна енергія їх підвищується та збільшується вміст компонентів, значущих для харчування. Економічно вигідно та ефективно застосування ультразвуку в кондитерській промисловості. Ультразвукові коливання дозволяють прискорити кристалізацію сахарози та отримати однорідну масу при виготовленні помадки. Під дією ультразвуку покращуються специфічні та смакові якості шоколаду та значно скорочується тривалість його обробки в оздоблювальних машинах [34].

У консервній промисловості ультразвук застосовується для отримання тонкодисперсних паст та пюре, які добре засвоюються організмом.

Існує високоефективна технологія для виділення з виноградного соку солей винної кислоти у вигляді кристалів за допомогою ультразвукових хвиль, що дозволяє значною мірою стабілізувати напій і попутно отримати сировину для виробництва винної кислоти, яка є дуже затребуваною.

Є дані про ефективність використання ультразвуку для потреб солодової промисловості. Обробка зерна в кавітаційному полі суттєво покращує характеристики солоду та дозволяє вести процес більш енергоефективно. У пивоварній та виноробній галузі ультразвук також знаходить своє застосування, проте часто ці роботи не виходять за рамки академічних досліджень.

Для контролю та автоматизації різних технологічних процесів використовують ультразвукові датчики та прилади. Ультразвукові датчики працюють з п'єзоелектричним перетворювачем, який є звуковим випромінювачем, так і приймачем.

Для безконтактного вимірювання рівня різних рідин, зокрема агресивних, використовують радарний датчик визначення рівня рідини (рис. 1.12). Головним

елементом даного датчика є радіолокатор, частота випромінювання якого змінюється за лінійним законом. Передбачається, що рідина відображає випромінювання локатора, тому якщо розташувати випромінювач-приймач всередині резервуара і фіксувати затримку відбитого сигналу щодо джерела сигналу, то можна визначити рівень рідини за величиною затримки. Для визначення затримки використовується лінійна модуляція частоти джерела. Якщо частота вихідного сигналу змінюється за лінійним законом, то відбитий сигнал, що має тимчасовий зсув щодо вихідного, матиме також меншу частоту. За величиною частотного зсуву можна однозначно судити про величину тимчасової затримки між двома сигналами, а отже, і про відстань до поверхні рідини.

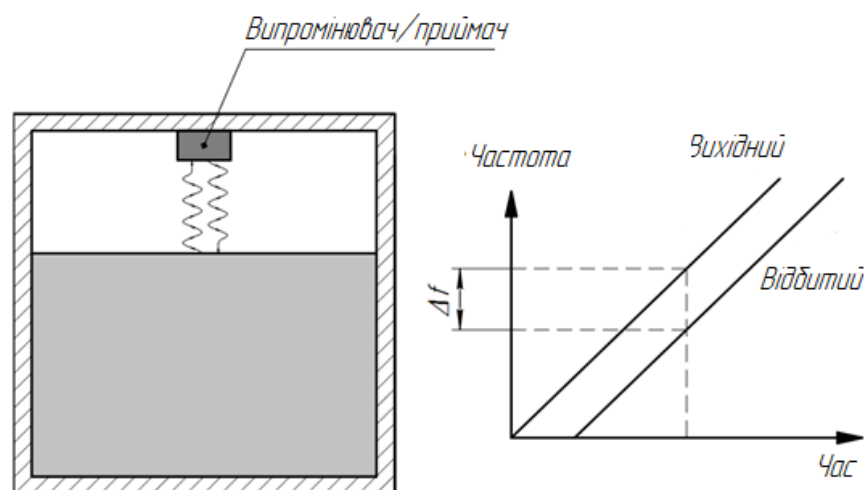


Рис. 1.12 - Загальний принцип функціонування датчика рівня радарного типу

Основні переваги приладу: відсутність рухомих частин, контакту із середовищем; універсальність – може працювати практично з будь-яким середовищем за різних умов; висока точність. Основним недоліком радарних датчиків є їхня висока вартість.

Також для безконтактного вимірювання рівня різних рідин використовують ультразвукові датчики визначення рівня рідини. У датчиках даного типу використовується схема, багато в чому схожа на схему датчика радарного типу. У резервуарі встановлюється блок, що складається з генератора та приймача ультразвукових хвиль, так само як, наприклад, в ультразвукових витратомірах та

ультразвукових дефектоскопах. Випромінювання генератора ультразвукових хвиль проходить газове середовище, що відбивається від поверхні рідини і потрапляє на приймач. Визначивши тимчасову затримку між випромінюванням та прийомом і знаючи швидкість поширення ультразвуку в даному газовому середовищі, можна обчислити відстань до поверхні рідини, тобто визначити її рівень. Ультразвукові датчики мають майже всі позитивні якості датчиків радарного типу, але при цьому вони мають точність трохи нижче радарних датчиків, хоча і простіші за внутрішнім пристроєм.

Ультразвукові витратоміри (рис. 1.13) використовуються для оперативного вимірювання об'ємної витрати та швидкості рідини у технологічних лініях. У пристроях даного типу використовується властивість звукових хвиль змінювати швидкість свого поширення рухомому середовищі. Якщо встановити джерело (А) та приймач (В) ультразвуку зі зміщенням (рис. 1.13), то про швидкість потоку можна судити зі зміни швидкості поширення звукової хвилі вздовж відрізка АВ.

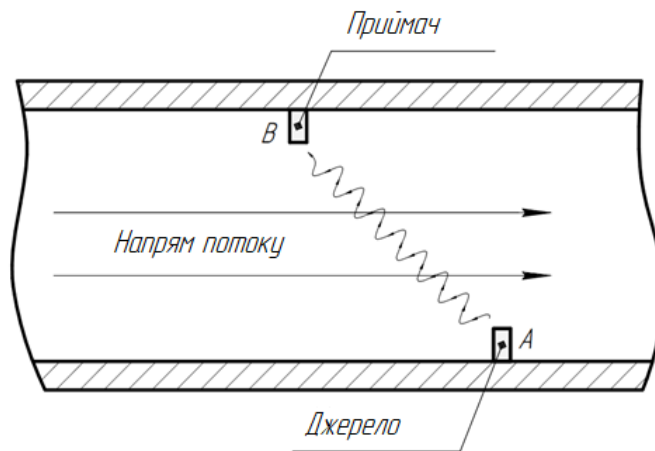


Рис. 1.13 - Загальна схема розташування ключових елементів ультразвукового витратоміра

Ультразвукові дефектоскопи (рис. 1.14) [33, 34] використовують для контролю якості виробів із твердих матеріалів з використанням методів неруйнівного контролю. В основу функціонування дефектоскопа даного типу покладено властивість проникнення ультразвукових хвиль у тверді тіла. Швидкість поширення ультразвукової хвилі переважно залежить від наступних параметрів:

щільність середовища, пружність середовища, наявність дефектів у вигляді тріщин, порожнин. Датчик має джерело та приймач ультразвукових хвиль. Якщо між джерелом (А) і приймачем (В) помістити досліджуваний об'єкт і вимірювати час проходження хвиль від А до В, можна, знаючи відстань АВ, визначити швидкість поширення ультразвукової хвилі через конкретну ділянку твердого тіла. Це дозволяє досліджувати внутрішню структуру твердого тіла на наявність дефектів, коливань щільності і модуля пружності.

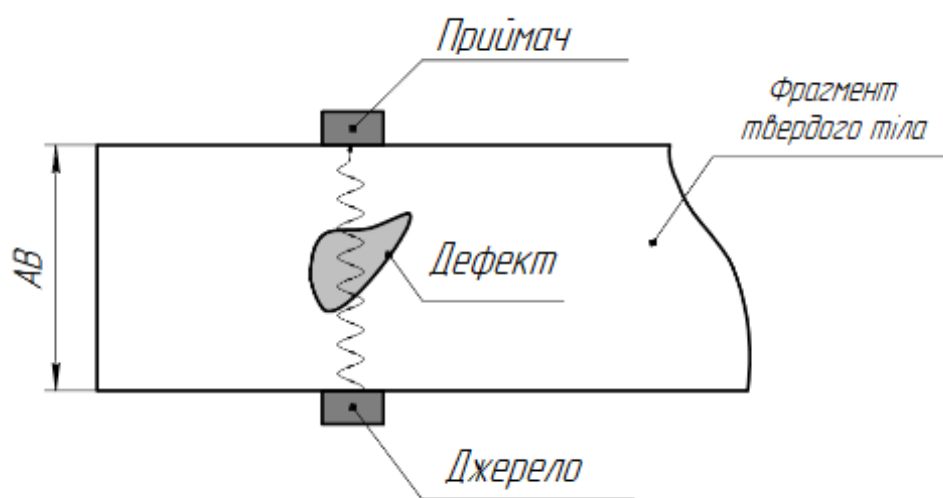


Рис. 1.14 - Виявлення прихованого дефекту за допомогою ультразвукового дефектоскопу

Нині ультразвук широко застосовується для вирішення складних технологічних завдань. У роботі представлений метод визначення та контролю пасажиропотоку в умовах щільного потоку людей у контрольованому перерізі дверного отвору громадського транспорту. Метод заснований на використанні ультразвукових датчиків вимірювання відстані HCSR04, розташованих над людиною, що проходить [26]. Застосування запропонованого методу є актуальним для підприємств, що здійснюють пасажироперевезення [27]. Недоліком даного методу є неможливість визначення кількості пасажирів та їх напрямок зі збільшенням щільності пасажиропотоку.

Науковцями запропоновано установку з модернізованим дозатором харчових сипких продуктів із застосуванням як стабілізатора потоку частинок механічної енергії ультразвуку (рис. 1.15).

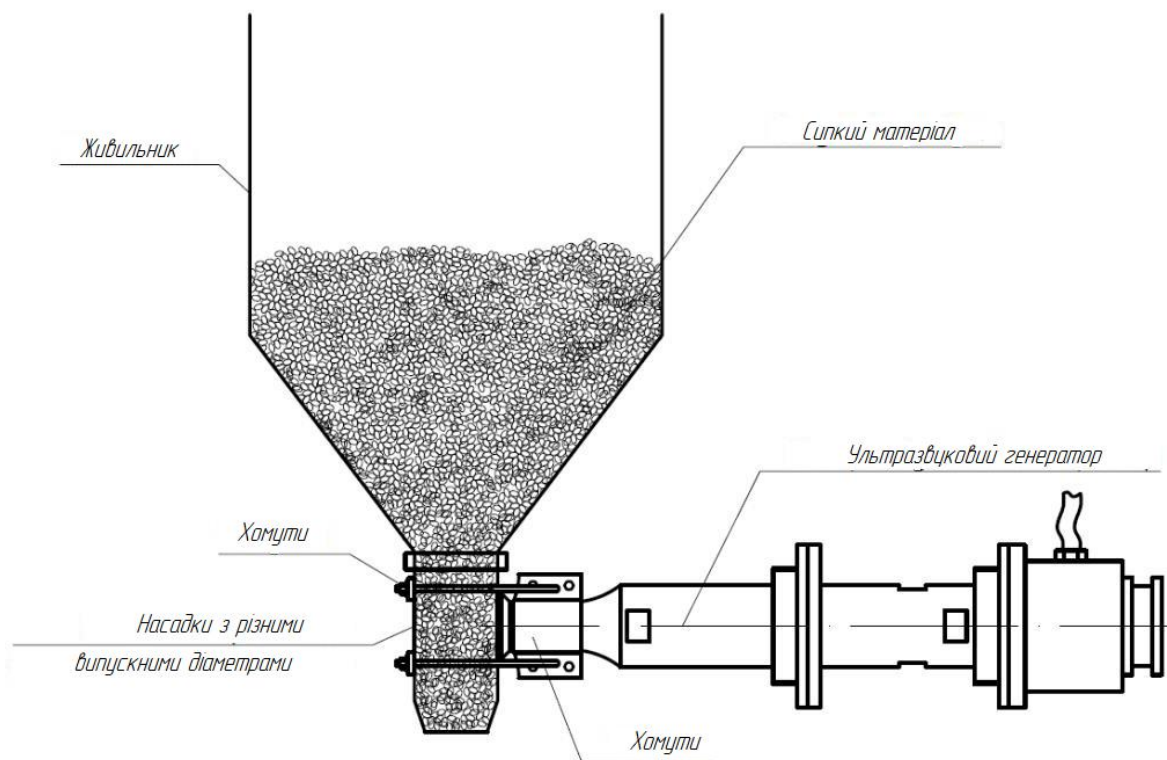


Рис. 1.15 - Лабораторна установка ультразвукового живильника

Сипкі продукти при впливі ультразвуку представляють свого роду псевдорідкість, тому що частинки від впливів звукових хвиль рухливі відносно один одного (вагаються близько 20 000 разів/секунду). Застосування ультразвукового випромінювача дозволяє знизити енергетичні витрати через зменшення маси елементів живильника, що коливаються, які практично всю енергію віддають поглинаючому зернистому продукту. Це суттєво знижує шум роботи такого вібраційного пристрою. Особливістю ультразвукового живильника є деяка електризація крупи, що практично не впливає на сипкість зернистого матеріалу, але майже на 100% виключає запилення в процесі упаковки [11]. Однак не наводяться дані роботи установки під час дозування зернового вороху. Також варто враховувати, що вплив ультразвукових коливань високої інтенсивності на зернову масу може спричинити пошкодження твердої оболонки зерна, а коливальні

рухи зернових мас можуть змінювати температурний режим зернового шару. Перегрів та пошкодження зерна істотно впливає на його збереження.

Руйнівні властивості ультразвукових хвиль високої потужності можна використовувати для інтенсифікації процесу проростання зерна. При обробітку польових культур витрати праці значно знижуються у разі використання насіння, схожість яких не нижче 95%. Такого насіння вкрай недостатньо, оскільки багато хто з них перебуває у стані органічного спокою. Тому їх рекомендується скарифікувати, тобто «порушити» цілісність оболонки [22].

У роботах [25, 26] пропонується використання енергії ультразвукових хвиль для скарифікації насіння, що має тверду оболонку. При застосуванні ультразвукової кавітації порушення оболонки насіння відбуваються складні фізичні процеси, які супроводжуються високим тиском, температурою і швидкістю руху стінок каверн. Основним фактором, що діє, в процесі руйнування є мікроударна хвиля, що виникає в момент захоплення кавітаційних каверн. Запропоновані способи обробки зерна дозволяють скоротити час, що витрачається на процес пророщування зерна і використовувати їх як спосіб знезараження зерна. Представлені способи застосування ультразвуку технологічно неможливо застосувати у пневмосепаруючих каналах.

Вченими розроблено установку, оснащену ультразвуковим випромінювачем для підвищення якості сепарування круп (рис. 1.16).

Працює електростатичний сепаратор в такий спосіб. Вібруючий лоток із пластику, закріплений у сталевому затискному кільці, жорстко пов'язаному з ультразвуковим концентратором, механічно впливає на продукти лушення до подачі їх в електростатичне поле та заряджає їх різним електричним потенціалом, пропорційним фізичним властивостям частинок. У зв'язку з цим у сепараторі відбувається інтенсивний поділ продуктів лушення на фракції кулонівськими силами. Після зарядки матеріал, що розділяється, надходить з дозатора в зону з електростатичним полем. Поле створюється вертикально розташованими електродами, що не коронують. Падаючи вниз під дією сил тяжіння, заряджені частинки лушпиння, дробленого і цілого зерна відхиляються у бік пластин, що під

напругою під дією кулонівських сил [28]. Недоліком цього методу є використання високої напруги. Оператору необхідно мати відповідну групу допуску електробезпеки для роботи на установці. Ще одним недоліком є утруднення процесу сепарації при підвищеній вологості матеріалу, поступове накопичення шару дрібних частинок внаслідок осадження їх на електроди. Також не здійснено випробування установки при сепарації зернового вороху.

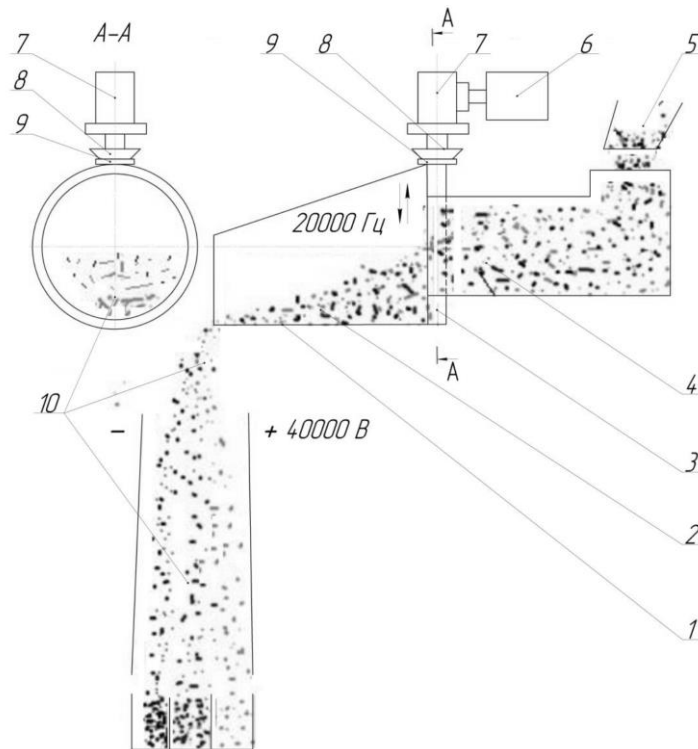


Рис. 1.16 - Схема електростатичного сепаратора із зарядкою продуктів лущення в полі ультразвуку: 1 – віброуючий лоток (пластик); 2 – продукти обвалення (оболонка, ядро, необрушене зерно); 3 – металеве затискне кільце з хомутом для передачі вібрацій корпусу; 4 – живильник-бункер; 5 – подача продуктів обвалення; 6 – ультразвуковий генератор; 7 – магнітострикційний перетворювач; 8 – ультразвуковий концентратор; 9 – фланець; (- / +) – прикладена напруга до пластин електростатичного сепаратора; 10 – електростатично заряджені продукти лущення

Існує спосіб визначення профілактики твердих тіл у реальному масштабі часу за допомогою лазерної ультразвукової томографії. Основний принцип методу полягає в опроміненні об'єкта термоакустичним згенерованим ультразвуковим

пучком, реєстрації розсіяного та відбитого пучка антеною детекторів та комп'ютерної реконструкції зображення об'єкта – томограми – з використанням спеціалізованих алгоритмів. Схема експериментальної установки, яка використовується як прототип лазерного ультразвукового профілометра, зображена на рисунку 1.17.

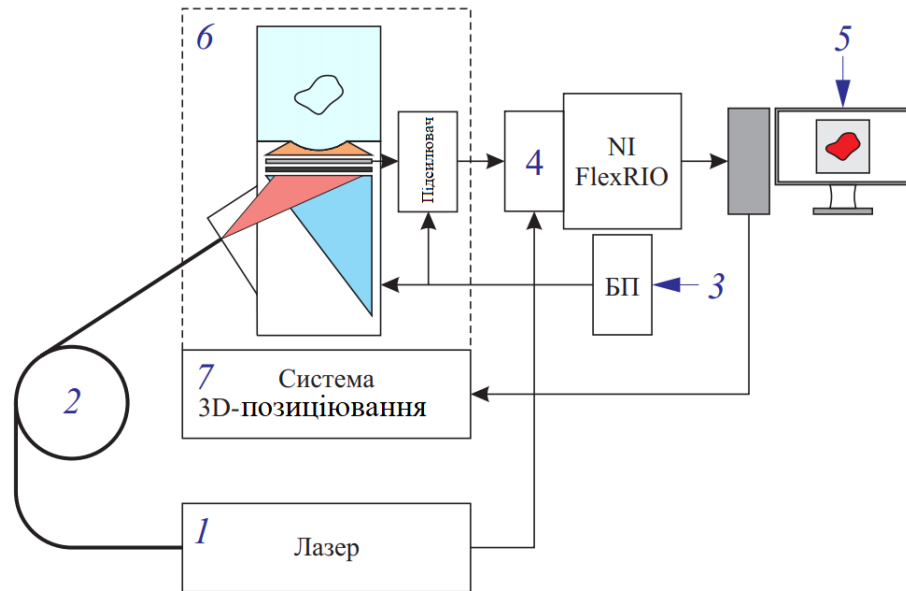


Рис. 1.17 - Схема багатоканальної системи для лазерної ультразвукової та оптико-акустичної томографії: 1 – лазер, 2 – система доставки лазерного випромінювання, 3 – блок живлення, 4 – система збору та обробки експериментальних даних, 5 – персональний комп'ютер, 6 – приймальна антена, 7 – система тривимірного позиціонування

Система дозволяє змінювати відносно положення об'єкта у тримачі з точністю 0,01 мм. Оптичні профілометри дозволяють виділити роздільну здатність до часток нанометрів у поєднанні з відносно високою швидкістю сканування [32]. Застосування методу контролю профілю поверхонь є актуальним при виробництві об'єктів складних форм. Застосовувати запропоновану установку контролю параметрів стану зернового шару нераціонально. У однорідному прозорому середовищі світло поширюється прямолінійно. Однак при переході з одного середовища в інше він переломлюється, змінюючи напрямок залежно від різниці в їхній оптичній щільності. У процесі обробки зерна виділяється зерновий пил [31],

який перешкоджає проникненню променя світла та заломлює його, створюючи похибку у роботі установки. Визначення параметрів зернового шару в потоці спричинить збільшення періоду обробки даних, знизивши продуктивність потокової лінії.

1.5 Висновки до першого розділу

- при поділі зернового вороху на фракції найбільшого поширення набув спосіб сепарування зернових сумішей у вертикальному повітряному потоці – пневмосепаруючому каналі через конструкційну простоту і компактність пристрою;

- зміна властивостей оброблюваного матеріалу під час роботи неминуче викликає зміну аеродинамічного опору системи та швидкості повітря всередині шару матеріалу, що обробляється. Значне перевищення швидкості повітря від оптимальної призводить до винесення частинок основної культури у відходи, а зменшення цієї швидкості – зниження якості очищення. При роботі потокової лінії також можливі коливання в подачі матеріалу в ПСК, при збільшенні кількості матеріалу, що надходить в ПСК, збільшується товщина шару, що продується, що веде до зниження якості очищення. Мала подача призводить до зниження продуктивності;

- одним із способів управління станом шару в сушарці є використання УЗ далекомірів, так як вони видають інформацію про продукт в режимі реального часу, і точність визначення меншою мірою залежить від наявності пилу, вологості матеріалу та повітря. До недоліків цього способу слід віднести те, що хвиля УЗ пронизує шар у напрямку його руху. З цієї причини якісна оцінка внутрішньої структури зернового шару в ПСК зі змінними фізико-механічними властивостями в процесі його очищення неможлива;

- відсутність способу оперативного контролю за станом сепарованого шару в ПСК і підтримки його стану неминуче призводить до зниження продуктивності пневмосепаратора насіння та ефективності очищення зернових сумішей.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ЗЕРНОВОГО ВОРОХУ

2.1 Теоретичне обґрунтування параметрів ультразвукових далекомірів та їх розміщення у пневмосепараторі

Для ультразвуку зерновий шар у першому наближенні може постати у вигляді пористої квазістатичної структури з періодичними вузлами у вигляді зерен. Подібна модель дозволяє звернутися до хвильового явища, що спостерігається при проходженні хвиль крізь періодичну структуру – до дифракції хвиль, і відповісти на питання, якою довжиною має бути ультразвукова хвиля, що забезпечує надходження сигналів від випромінювачів до приймачів, розділених зерновим шаром.

Проведено дослідження дифракції ультразвукових хвиль на циліндрі та при проходженні їх через ряд зволікань, поміщених у воду (рис 2.1). Дифракція має місце тоді, коли довжина ультразвукової хвилі порівнянна або більше розміру перешкоди, що знаходиться на шляху. Якщо перешкода проти довжиною акустичної хвилі велика, то явища дифракції немає.

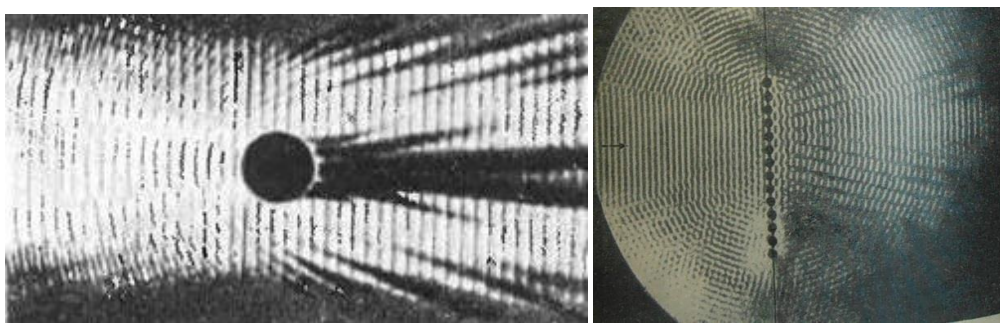


Рис. 2.1 - Фотографії дифракції ультразвукових хвиль на циліндрі та на проволочі, поміщених у воду

Для забезпечення працездатності пристрою оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, в процесі його сепарування необхідно, щоб довжина УЗ хвилі λ , мм, була більша або близька до

еквівалентного діаметра оброблюваного зернового матеріалу d_e , мм, тобто щоб виконувалася умова:

$$d_e \leq \lambda. \quad (2.1)$$

Довжину хвилі можна визначити як:

$$\lambda = \frac{v_{\text{хвилі}}}{\nu}, \quad (2.2)$$

де $v_{\text{хвилі}}$ – швидкість поширення УЗ хвилі;

ν – частота УЗ хвилі, Гц.

Шлях УЗ хвилі, L_3 , мм (рис. 2.2), що проходить через шар зернового вороху, може бути визначений наступним чином:

$$L_3 = L - d_e \cdot n + \frac{l_e \cdot k}{2} \cdot n, \quad (2.3)$$

де L – відстань від випромінювача до приймача, мм;

d_e – еквівалентний діаметр частинки матеріалу, мм;

n – кількість частинок зернового вороху на шляху УЗ хвилі;

k – емпіричний коефіцієнт, що залежить від довжини УЗ хвилі та форми частинок матеріалу;

l_e – еквівалентна довжина діаметра частинки, мм.

$$d_e = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}, \quad (2.4)$$

де a , b , c – відповідно довжина, ширина і висота частинки, мм.

$$k = \frac{l_p}{l_e}, \quad (2.5)$$

де l_p – довжина шляху ультразвукової хвилі при обгинанні поверхні частинки, мм;

l_e – еквівалентна довжина кола частки, мм.

$$l_e = \pi \cdot d_e. \quad (2.6)$$

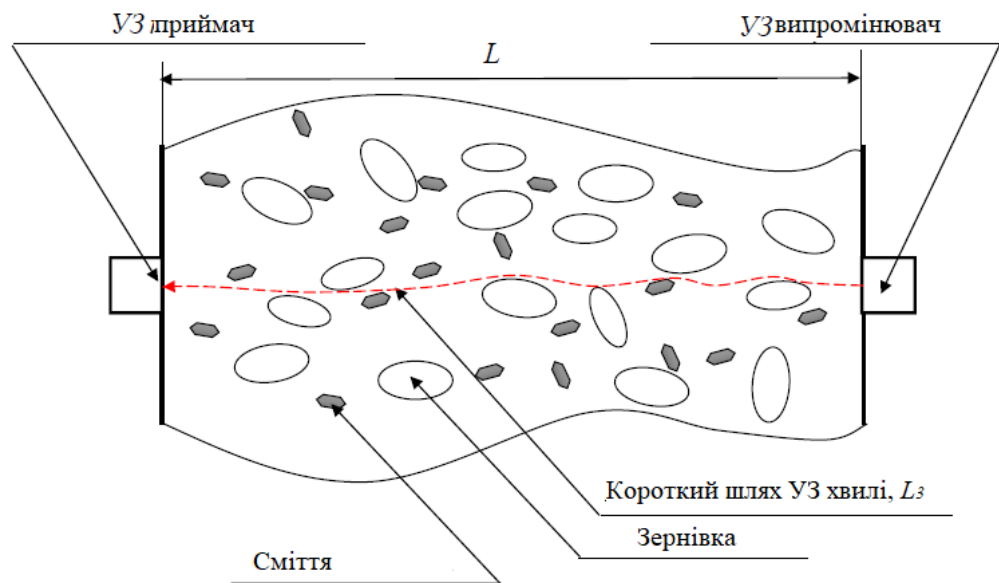


Рис. 2.2 - Схема руху ультразвукової хвилі, що проходить через шар зернового вороху

Очевидно L_3 , може прийняти значення

$$L < L_3 \leq L_{зп}, \quad (2.7)$$

де $L_{зп}$ – довжина шляху ультразвукової хвилі через щільний шар зернового вороху.

Сьогодні для вимірювання відстані широко використовуються УЗ далекоміри HC-SR04, їх популярність обумовлена низькою вартістю та простотою установки. Частота випромінювання УЗ хвилі далекоміра відповідно до паспортних даних становить 40 кГц, у такому випадку, довжина хвилі при швидкості звуку в повітрі 340 м/с становить 8,5 мм. Еквівалентний діаметр зерен сільськогосподарських культур може досягати для пшениці – 5,1 мм, для жита – 5,0 мм, для ячменю – 6,9 мм, для сої – 8,4 мм. Тобто довжина хвилі, що випромінюється УЗ далекоміром, більша або близька до розмірів перешкод, що виникають на її шляху, що показує, що ультразвукова хвиля не гаситиметься зерновим шаром, вона обгинатиме зерна. Тому далекоміри HC-SR04 можуть бути використані в системах контролю та керування станом зернового шару.

При одночасному поширенні в середовищі кількох ультразвукових хвиль у кожній певній точці середовища може спостерігатися суперпозиція хвиль – накладення цих хвиль, яке спотворюватиме картину сигналів навіть у відсутності зернового шару. Виконаємо розрахунок кількості УЗ далекомірів N_d , шт., необхідні оцінки стану шару зернового вороху в пневмосепараторі залежить від відстані між випромінювачем і приймачем L_b , мм, і довжини L_d , мм, де необхідно здійснити оцінку стану шару (рис. 2.3 і 2.4) з урахуванням виключення явища накладання УЗ хвиль.

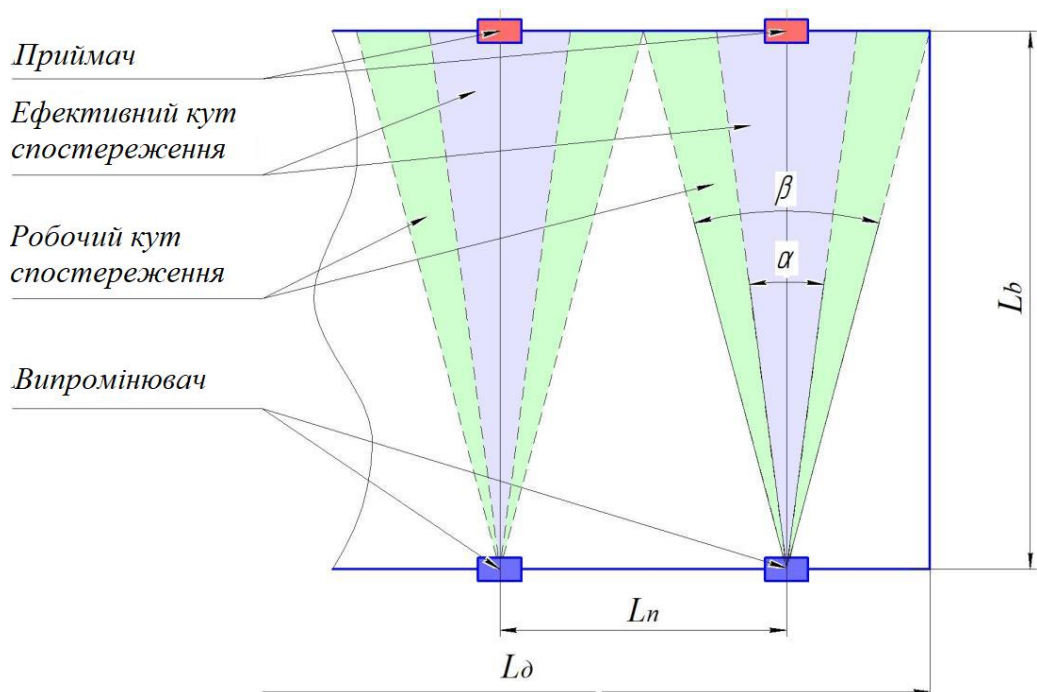


Рис. 2.3 - Дані розрахунку необхідної кількості УЗ далекомірів

$$N_d \leq \frac{L_d}{L_n}, \quad (2.8)$$

де L_n – відстань між УЗ випромінювачами.

$$L_n \geq 2 \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot L_d. \quad (2.9)$$

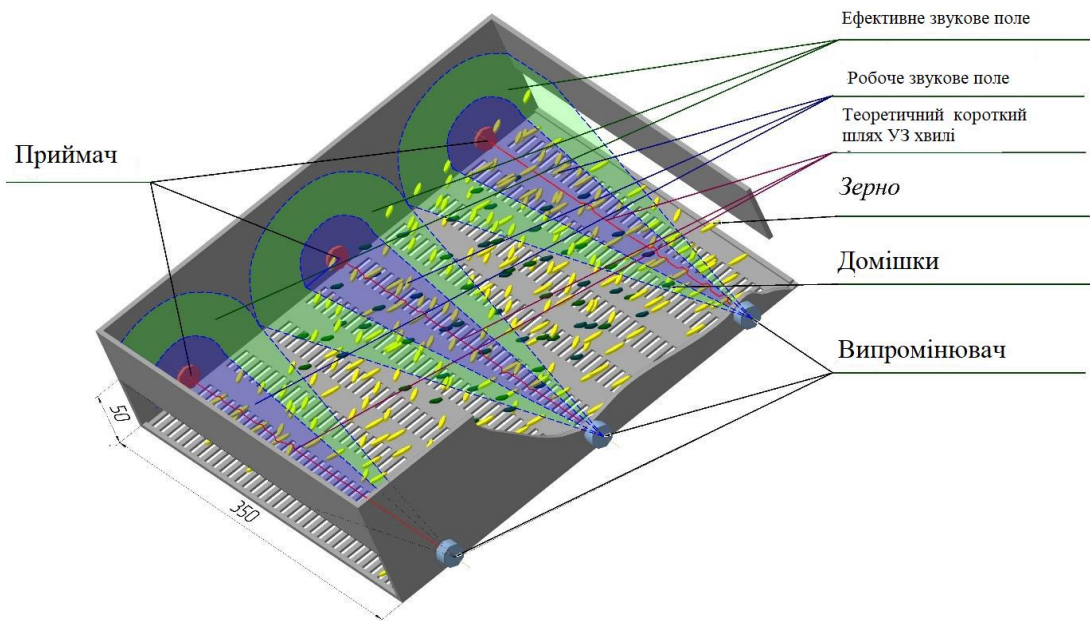


Рис. 2.4 - Розміщення УЗ далекомірів в пневмосепараторі

Відповідно до характеристик використовуваних УЗ далекомірів, робочий кут спостереження УЗ далекомірів становить 30° . З метою виключення суперпозиції УЗ хвиль у процесі роботи пристрою, УЗ далекоміри повинні бути розташовані вздовж опорної сітки на початку, середині і кінці пневмосепаратора по ходу руху матеріалу, що обробляється.

2.2 Обґрунтування принципу роботи пристрою оперативного контролю та підтримки шару зернового вороху в заданому стані

Для вирішення завдання застосування ультразвуку для управління процесом сепарації зернового вороху розроблена технологічна схема пневмосепаруючого каналу, оснащеного пристроєм оперативного контролю і підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається (рис. 2.5). Пневмосепаруючий канал складається з УЗ далекомірів 1; опорної сітки 2; вертикального пневмосепаруючого каналу 3; бункера живильника 4; живильного валика 5; вентилятора 6; фільтруючого елемента (на схемі не показано).

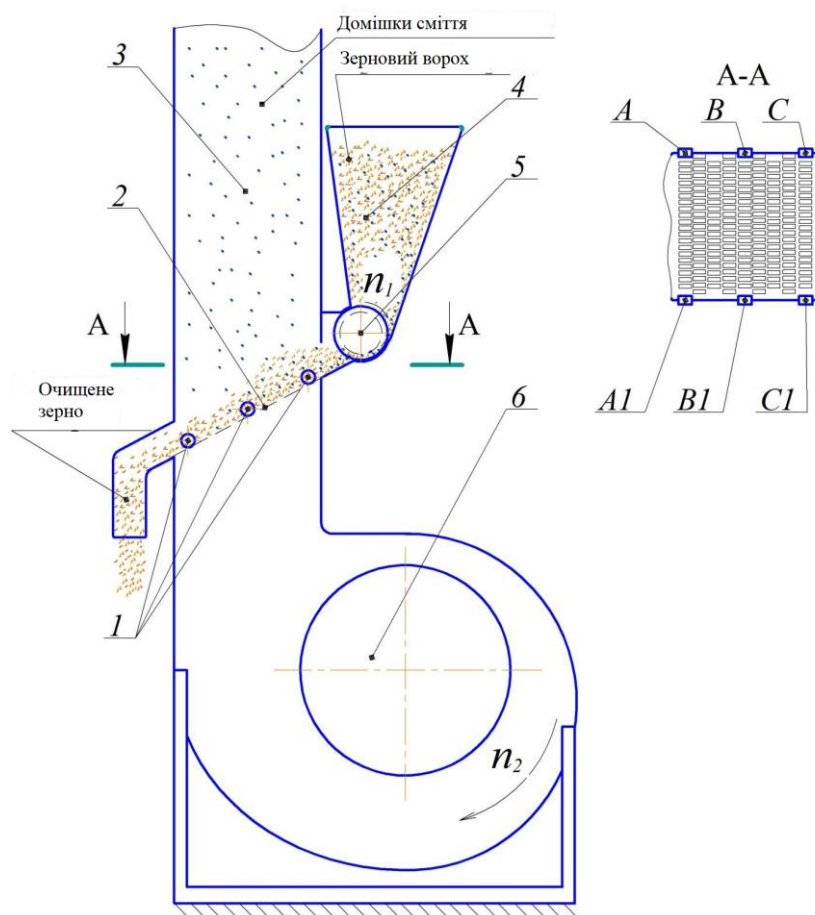


Рис. 2.5 - Технологічна схема пневмосепаратора зернового вороху, оснащеного ультразвуковими далекомірами: n_1 – частота обертання вала привода; n_2 – частота обертання вентилятора; A_1, B_1, C_1 – УЗ випромінювачі; А, В, С – УЗ приймачі; 1 – УЗ далекоміри; 2 – опорна сітка; 3 – вертикальний пневмосепаруючий канал; 4 – бункер живильник; 5 – живильний валик; 6 – вентилятор

Процес обробки зерна відбувається наступним чином: зерновий ворох від комбайна подається в живильний бункер 4, з бункера за допомогою приводного вала 5 зерновий ворох направляється у вертикальний пневмосепаруючий канал 3 на опорну сітку 2 і потрапляє під дію повітряного потоку, створюваного вентилятором 6. При русі зернового вороху вздовж опорної сітки відбувається його псевдозрідження і очищення від легких домішок, внутрішня структура шару, що продується, змінюється. Стан псевдозрідженого шару оперативно фіксується УЗ далекомірами 1. УЗ хвилі частотою 40 кГц випромінюються з періодичністю 150 ... 1500 мс випромінювачами А, В, С і проходять зі швидкістю близько

340 м / с через рухається зі швидкістю 0,000282 ... 0,16 м/с шар очищається поперек його руху до приймачів A_1, B_1, C_1 .

У динамічній моделі взаємодії ультразвуку із зерновим шаром можливі такі явища, як розсіювання, відображення від межі поділу середовищ та поглинання УЗ хвилі. Перше явище пов'язане з різкою зміною властивостей середовища на межі неоднорідностей: її щільність і модуль пружності хаотично змінюють свої значення в просторі, при цьому розміри перешкод, що зустрічаються на шляху хвилі УЗ порівняні з довжиною хвилі. Відображення УЗ хвилі від межі шару зернового вороху може відбуватися за високої насипної щільності, коли шар сприймається пристроєм як цілісний, непроникний УЗ хвиль в об'єкт оцінки. Якщо середовище має в'язкість і теплопровідність, то при поширенні УЗ хвилі відбувається її поглинання, тобто в міру віддалення від джерела її енергія зменшується. Дане явище не властиве для киплячого шару зернового вороху, тому що його в'язкість різко зменшується зі збільшенням швидкості газового потоку [13], а теплопровідність можна порівняти з теплопровідністю теплоізоляційних матеріалів.

Для своєчасної оцінки стохастичної структури шару зернового вороху, що очищається, і оперативного впливу на виконавчі органи ПСК з метою забезпечення якісного очищення зернового вороху виникає необхідність у визначенні мінімальної періодичності «просвічування» шару зернового вороху. Відповідно до характеристик використовуваних УЗ далекомірів, модуль УЗ далекоміра генерує пучок з восьми сигналів частотою 40 кГц (рис. 2.6).

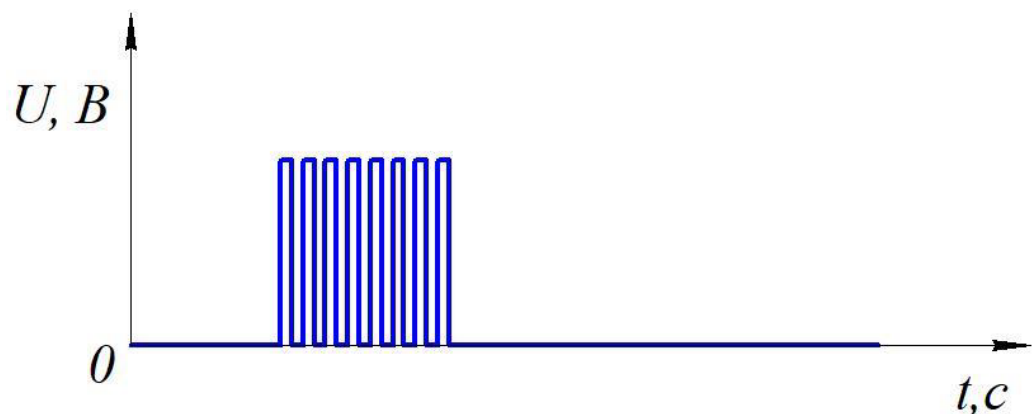


Рис. 2.6 - Схема генерування пучка імпульсів із восьми сигналів УЗ далекоміра НС-SR04

Тоді, відповідно до формули (2.10), час випромінювання УЗ хвилі, $t_{имп}$ становить 0,0002 с.

$$t_{имп} = \frac{8}{v}. \quad (2.10)$$

Для визначення мінімальної періодичності випромінювання пристроєм УЗ хвилі необхідно враховувати явище відображення УЗ хвилі від великих частинок зернового вороху, що стикаються. За наявності подібних відбитих хвиль може відбуватися «хибна» оцінка довжини УЗ хвилі, що проходить через зерновий матеріал, так як випромінювана УЗ хвиля відбивається від частинок шару зернового вороху і фіксується УЗ приймачем як результат генерації наступної. Досвідченим шляхом визначена періодичність випромінювання, що дозволяє виключити «хибну» оцінку шляху УЗ хвилі.

З метою оцінки впливу подачі повітря і зернового вороху на довжину шляху УЗ хвилі, що пронизує шар зернового вороху, що рухається на початку, середині і кінці пневмосепаруючого каналу, були проведені експериментальні дослідження, за методикою, викладеною в розділі 3. У процесі роботи пневмосепаратора значення довжин шляхів ультразвукових хвиль, отриманих з УЗ далекомірів, розташованих на початку – L_{1cp} , середині – L_{2cp} , і кінці – L_{3cp} , ПСК направлялися на обробку в мікроконтролерний блок управління і потім фіксувалися на персональному комп'ютері для подальшого аналізу.

Проведені дослідження показали, що частота обертання приводного вала, n_1 , що регулює подачу зернового вороху в ПСК з метою повного його завантаження і забезпечення максимальної продуктивності, має сильний зворотний кореляційний зв'язок (табл. 2.1) з різницею усереднених значень довжин шляхів ультразвук зернового вороху, отриманих з УЗ далекомірів на початку і наприкінці ПСК. Частота обертання робочого колеса вентилятора, n_2 , регулюючого подачу повітря, ПСК має також сильний зворотний кореляційний зв'язок з різницею усереднених значень довжин шляхів ультразвукових хвиль, пронизливих поперек рухається шар зернового вороху.

Таблиця 2.1

Результати кореляційного аналізу впливу подачі повітря і зернового вороху на різницю середніх значень довжин шляхів ультразвукових хвиль, що пронизують шар зернового вороху, що рухається спочатку, середині і кінці пневмосепаруючого каналу

Найменування показника	Величина коефіцієнта кореляції впливу подачі повітря і зернового вороху на різницю середніх значень довжин шляхів УЗ хвиль, що пронизують шар зернового вороху		
	отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку і наприкінці ПСК	отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку і середині ПСК	отриманих від УЗ далекомірів, розташованих у середині і наприкінці ПСК
Частота обертання приводного вала n_1	-0,96	-0,49	-0,59
Частота обертання робочого колеса вентилятора n_2	-0,18	0,57	-0,98

По різниці середніх значень довжин шляхів ультразвукових хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, на вході і на виході з пневмосепаруючого каналу встановлюється подача матеріалу – задається відповідна частота обертання двигуна. А по різниці середніх значень довжин шляхів ультразвукових хвиль, що пронизують шар зернового вороху, отриманих від УЗ далекомірів, в середній частині і на виході з пневмосепаруючого каналу встановлюється подача повітря – задається відповідна частота обертання двигуна вентилятора.

2.3 Розробка алгоритму роботи пристрою оперативного контролю та підтримки шару зернового вороху в заданому стані

На підставі висунутих теоретичних передумов і наявності кореляційного зв'язку між подачами повітря, матеріалу і різницею усереднених значень довжин

шляхів ультразвукових хвиль, що пронизують упоперек шар зернового вороху, що рухається на початку, середині і кінці пневмосепаруючого каналу, а також на підставі ідеї шару зернового вороху, що рухається, реалізованої в розробленому з цією метою пристрої розроблений наступний алгоритм роботи пристрою (рис. 2.7).

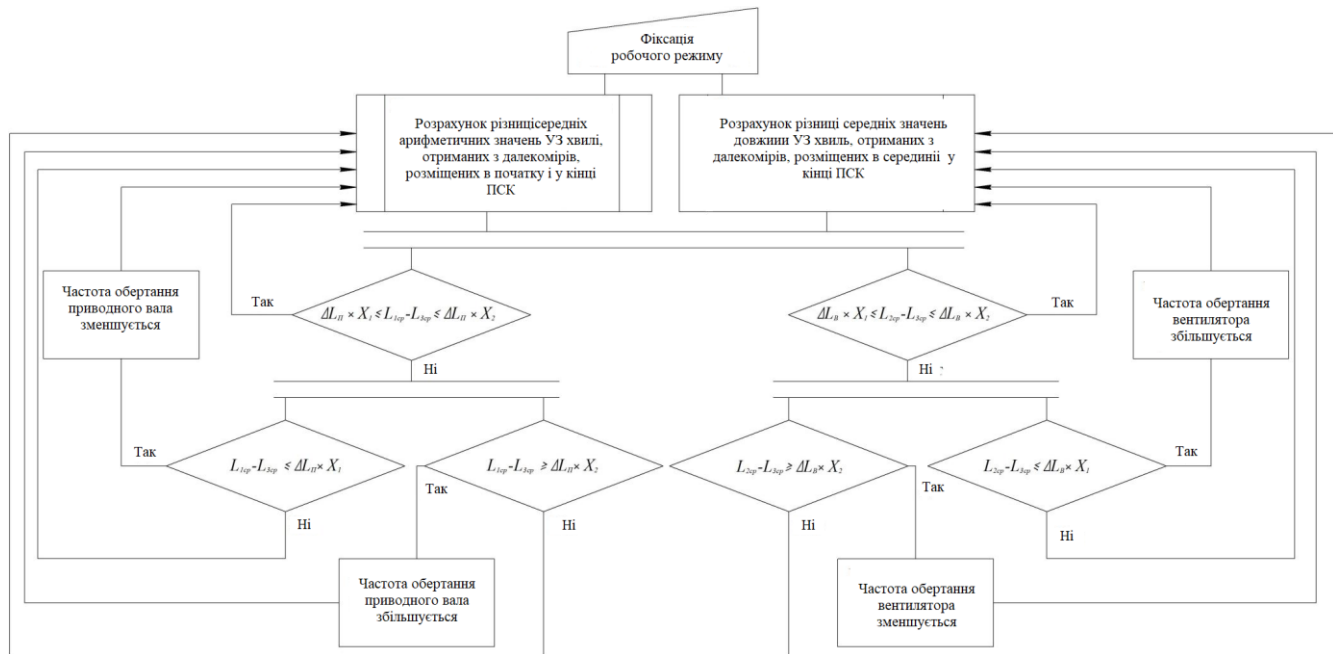


Рис. 2.7 - Алгоритм роботи системи управління подачі матеріалу і повітря

Системою проводиться постійний розрахунок $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$. Виходячи з того, що в зерновому воросі, що надходить на очищення, містяться домішки органічного та неорганічного походження різної вологості та щільності, форми та розмірів, шар має неоднорідну структуру – $L_{1CP}-L_{3CP}$ та $L_{2CP}-L_{3CP}$ знаходяться у великих межах і відхиляються від заданих значень. При виявленні відхилень $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$ від заданих $\Delta L_{П}$ і $\Delta L_{В}$, системою проводилося регулювання подачі матеріалу та повітря в ПСК до того моменту, поки $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$ не входять у заданий діапазон (2.11), (2.12):

– для керування частотою обертання приводного вала:

$$\Delta L_{П} \cdot X_1 \leq L_{1CP} - L_{3CP} \leq \Delta L_{П} \cdot X_2, \tag{2.11}$$

де X_1, X_2 – величини, що визначають відповідно нижні та верхні межі інтервалу варіювання для $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$, перебуваючи в якому вплив на робочі органи ПСК не проводилося.

– для керування частотою обертання вентилятора:

$$\Delta L_B \cdot X_1 \leq L_{2CP} - L_{3PC} \cdot X_2. \quad (2.12)$$

За дотримання умов (2.11) та (2.12) режим роботи ПСК є робочим.

Системою передбачено незалежне обчислення різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ, розташованих на початку і наприкінці ПСК – за якими проводиться управління частотою обертання приводного вала, і УЗ далекомірів, розташованих у середині і наприкінці – управління частотою обертання вентилятора (рис. 2.8).

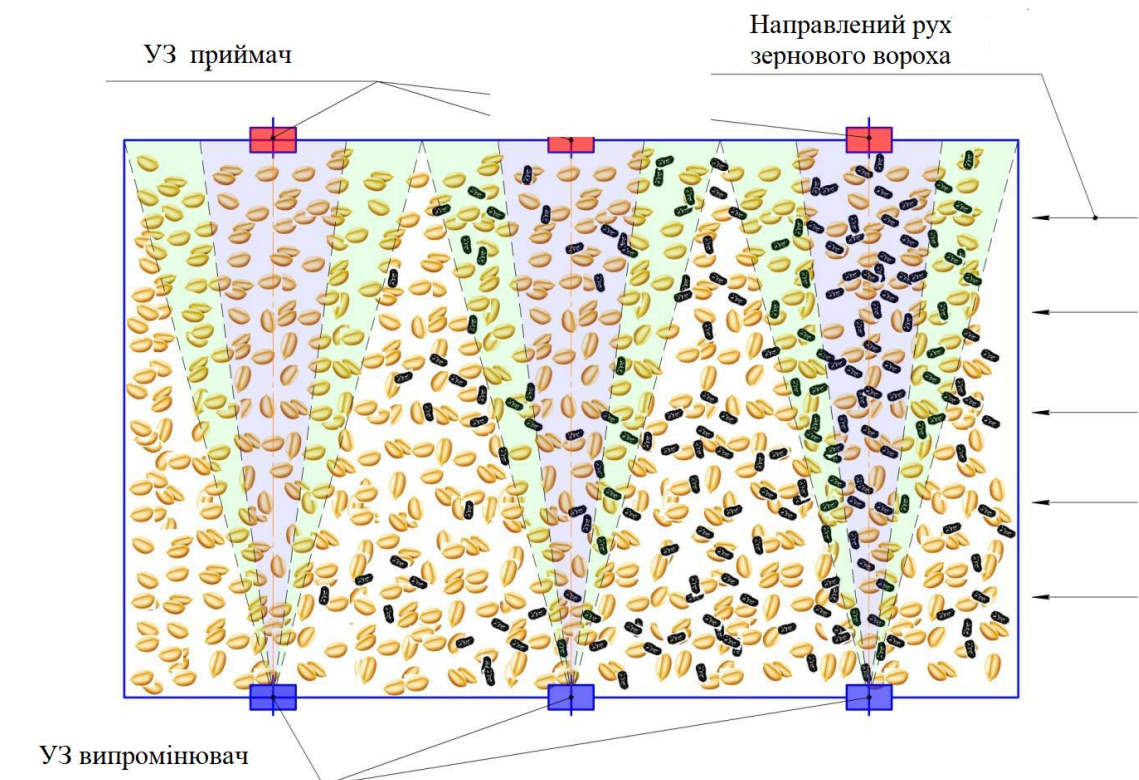


Рис. 2.8 - Схема процесу при робочому режимі роботи ПСК

Якщо $L_{1CP} - L_{2CP} \leq \Delta L_{II} \cdot X_1$ і $L_{2CP} - L_{3CP} \leq \Delta L_B \cdot X_1$, то на виході з пневмосепаруючого каналу в оброблюваному матеріалі будуть присутні домішки (рис. 2.9). Тоді блок управління зменшить частоту обертання приводного вала і (або) збільшує частоту обертання вентилятора для забезпечення якісного очищення зернового вороху від домішок і їх виділення на 2/3...3/4 довжини решета ПСК.

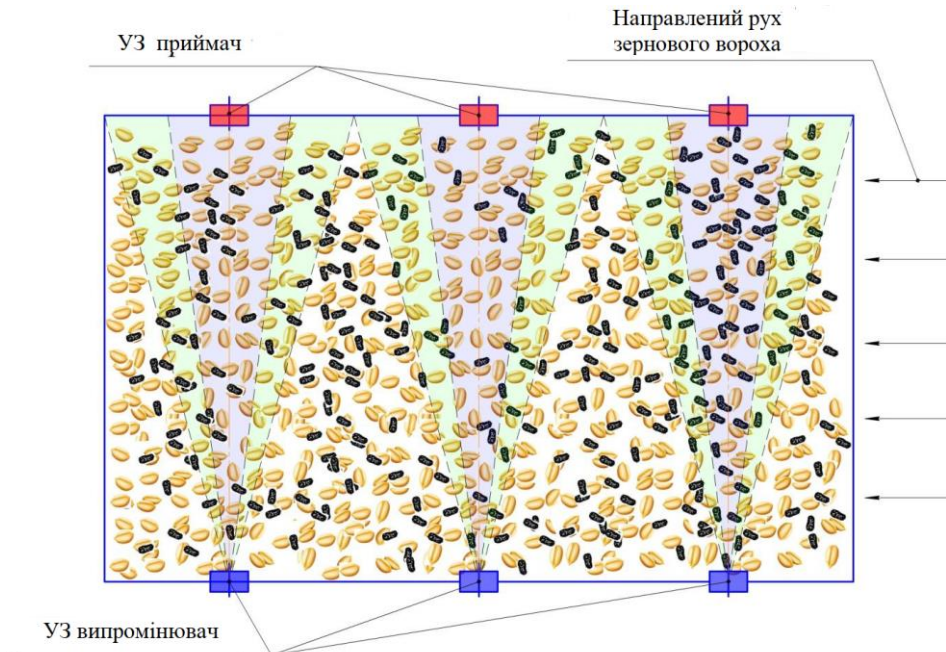


Рис. 2.9 - Схема процесу сепарації при відхиленні за верхню межу $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$ від робочого режиму роботи

У разі якщо $L_{1CP} - L_{2CP} \geq \Delta L_{П} \cdot X_1$ і $L_{2CP} - L_{3CP} \geq \Delta L_{B} \cdot X_1$, то спостерігається винесення основного матеріалу в осадову камеру ПСК (рис. 2.10). Тоді блок управління збільшить частоту обертання приводного вала і (або) зменшить частоту обертання вентилятора для забезпечення якісного очищення зернового вороху від домішок та їх виділення на $2/3 \dots 3/4$ довжини решета ПСК.

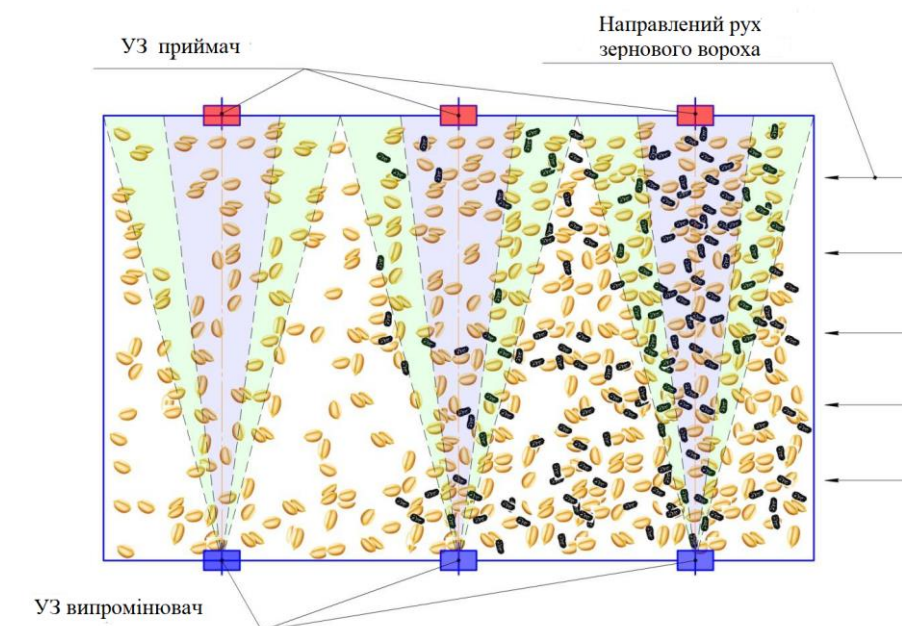


Рис. 2.10 - Схема процесу сепарації при відхиленні за верхню межу $L_{1CP}-L_{3CP}$ і $L_{2CP}-L_{3CP}$ від робочого режиму роботи ПСК

2.4 Теоретичні передумови забезпечення якісної оцінки очищеного зернового вороху за допомогою розробленого пристрою

До винайдення способу оцінки внутрішньої структури шару зернового вороху, оцінити її не було можливим. У 4 главі наведено кореляційно-спектральний аналіз стану шару зернового вороху за різних режимів роботи ПСК. Це стало можливим завдяки новому способу та розробленій на підставі його методики.

Передбачається, що для забезпечення якісної оцінки стану шару зернового вороху, під час «просвічування» УЗ хвилею зерновий ворох пройде шлях не більше $1 \dots 2 de$. Необхідно визначити довжину шляху зернівки за час проходження УЗ хвилі від випромінювача до приймача через шар зернового вороху, щоб проаналізувати якість оцінки стану шару зернового вороху у процесі очищення.

Шлях зернівки $L_{\text{зерн.}}$, мм, в пневмосепаруючому каналі в процесі роботи сепаратора можна визначити таким чином:

$$L_{\text{зерн}} = \frac{v_{\text{зерн}} \cdot t_{\text{випр}}}{1000}, \quad (2.13)$$

де $v_{\text{зерн}}$ – швидкість руху зернівки в пневмосепаруючому каналі, м/с;

$t_{\text{випр}}$ – час проходження УЗ хвилі від випромінювача до приймача через шар зернового вороху, с.

Швидкість руху зернівки в пневмосепарувальному каналі приймемо рівній швидкості потоку зернового вороху, яка може бути розрахована виходячи з продуктивності установки

$$v_{\text{зерн}} = \frac{G}{S_{\text{пот}} \cdot \rho \cdot 3600}, \quad (2.14)$$

де G – продуктивність ПСК, кг/год;

$S_{\text{пот}}$ – площа поперечного перерізу потоку зернового вороху, м²;

ρ – густина потоку зернового вороху кг/м³.

Щільність потоку зернового вороху можна виразити так:

$$\rho = \frac{G}{V_{ш} \cdot 3600}, \quad (2.15)$$

де $V_{ш}$ – об'єм шару зернового вороху, м^3 .

Об'єм шару зернового вороху (2.17) можна виразити через пористість шару зернового вороху (2.16)

$$E = \frac{V_{сл} - V_{зерн}}{V_{сл}}, \quad (2.16)$$

$$V_{сл} = \frac{-V_{зерн}}{E - 1}. \quad (2.17)$$

де E – пористість шару зернового вороху;

$V_{зерн}$ – обсяг шару зернового вороху, без урахування порожнини, мм^3 .

Питання визначення залежності пористості зернового вороху від довжини шляху УЗ хвилі займалися вчені Волхонов М.С., Смирнов І.А. У роботі [32] представлені лабораторні дослідження залежності довжини шляху ультразвукової хвилі від різниці псевдозрідженого шару пшениці (рисунок 2.11).

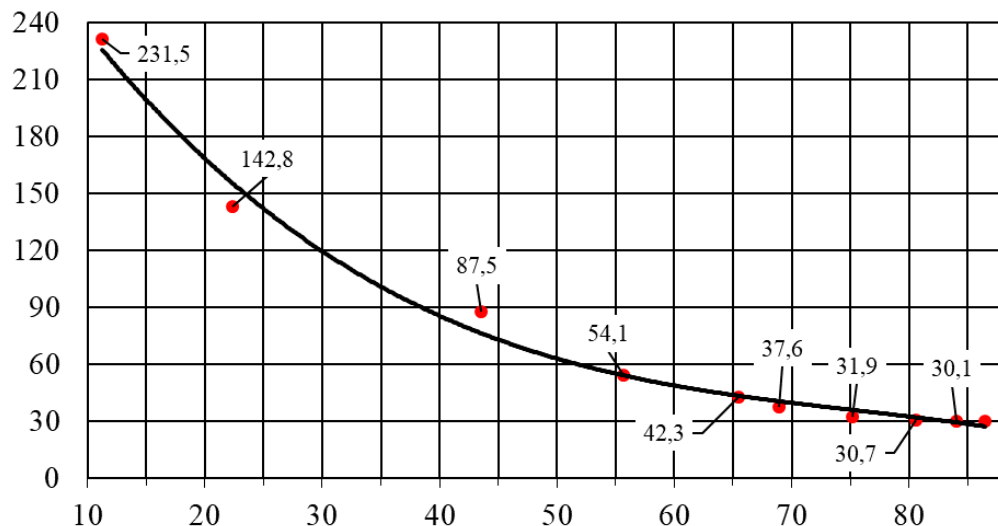


Рис. 2.11 - Залежність шляху ультразвукової хвилі від пористості псевдозрідженого шару пшениці: початкова висота шару сипучого матеріалу $H_{поч} = 35$ мм; відстань між випромінювачем та приймачем $L=30$ мм; частота ультразвукової хвилі = 40 кГц

Апроксимуючи представлені дані, отримана залежність пористості пшениці від довжини шляху УЗ хвилі

$$L = -1145 \cdot \ln(E) + 5338,2, \quad (2.18)$$

де E – пористість псевдозрідженого шару пшениці.

Запропонована автором залежність шляху ультразвукової хвилі від пористості псевдозрідженого шару пшениці справедлива для відстані між випромінювачем та приймачем 30 мм, для розширення сфери застосування залежності введемо коефіцієнт перекладу k_p

$$k_p = \frac{L}{30}, \quad (2.19)$$

де L - відстань між випромінювачем та приймачем у пристрої, мм.

Тоді пористість шару зернового вороху в пневмосепаруючому каналі в залежності від довжини шляху УЗ хвилі можна представити таким чином

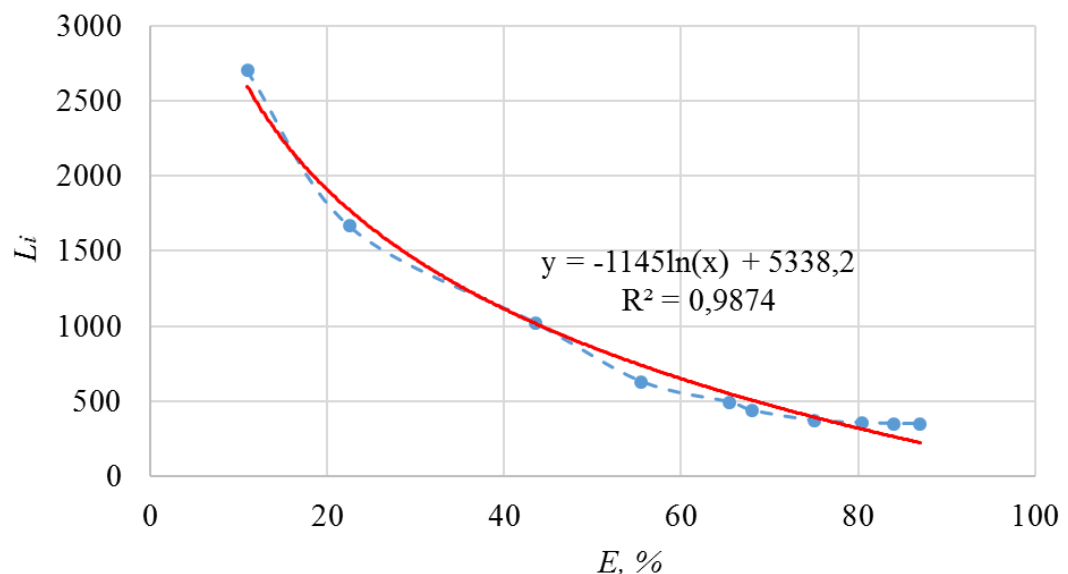


Рис. 2.12 - Залежність довжини шляху ультразвукової хвилі від пористості шару зернового вороху: відстань між випромінювачем та приймачем $L=350$ мм; частота ультразвукової хвилі = 40 кГц.

Визначимо обсяг зернового вороху без урахування порожнеч, m^3 :

$$V_{\text{зерн}} = \frac{G}{\rho_{\text{зерн}} \cdot 3600}, \quad (2.20)$$

де G – продуктивність пневмосепаратора, для теоретичних розрахунків приймаємо рівним 2000 кг/год;

$\rho_{\text{зерн}}$ – насипна густина зерна. Для пшениці $\rho_{\text{зерн}} = 760\text{-}800$ кг/м³, для теоретичних розрахунків приймаємо $\rho_{\text{зерн}} = 760$ кг/м³.

Зробимо розрахунок часу випромінювання УЗ хвилі $t_{\text{вун}}$, с. у процесі роботи пристрою:

$$t_{\text{вун}} = t_{\text{д}} + t_{\text{нз}}, \quad (2.21)$$

де $t_{\text{д}}$ – час випромінювання УЗ хвилі далекоміром;

$t_{\text{нз}}$ – час дискретизації випромінювання УЗ хвилі випромінювачем.

Для визначення характеру зміни пористості шару зернового вороху в процесі обробки матеріалу в ПСК, в областях просвічування УЗ далекомірів А, В, С (рис. 2.13) скористаємося залежністю, отриманою в результаті транспонування осей графіка, представленою на рисунку 2.12.

$$E = -35,49 \ln(L_3) + 288,1. \quad (2.22)$$

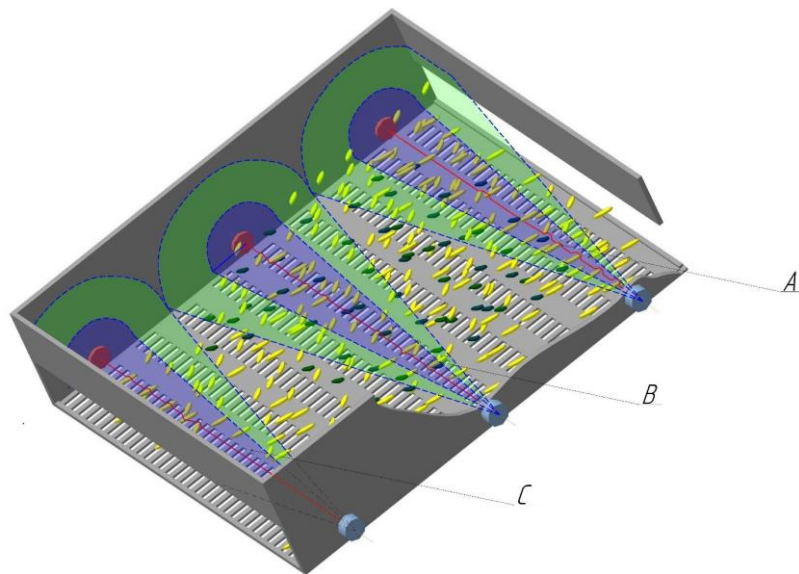


Рис. 2.13 - Розташування областей просвічування зернового шару УЗ далекомірами у ПСК: А – область просвічування зернового шару УЗ далекоміром, розташованим на початку ПСК; В – область просвічування зернового шару УЗ далекоміром, розташованим у середині ПСК; С – область просвічування зернового шару УЗ далекоміром, розташованим наприкінці ПСК

В результаті аналізу даних, отриманих у ході проведення виробничих випробувань, отримана наступна залежність зміни пористості шару зернового

вороху в областях просвічування УЗ далекомірами А, В, С від часу роботи ПСК (рис. 2.14).

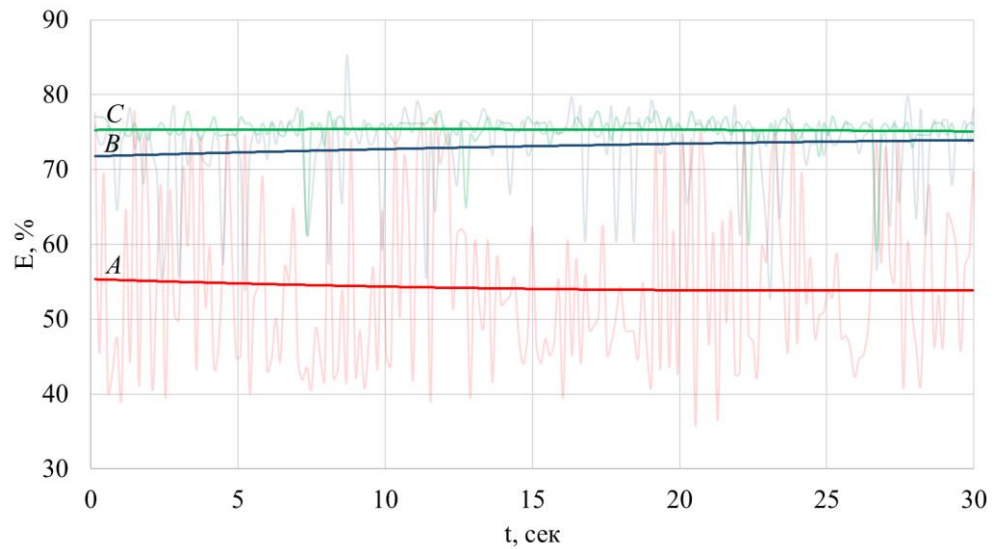


Рис. 2.14 - Залежність зміни пористості шару зернового вороху у процесі обробки під час роботи ПСК

Виходячи з наведених даних можна дійти висновку, що в ході обробки зернового вороху в ПСК в області просвічування УЗ далекоміра А пористість шару зернового вороху дорівнює 56,2%, в області просвічування УЗ далекоміра В – 72,8%, в області просвічування УЗ далекоміра С – 73,9%. Початкова різниця шару зернового вороху A_0 дорівнює 11% (рис. 2.15).

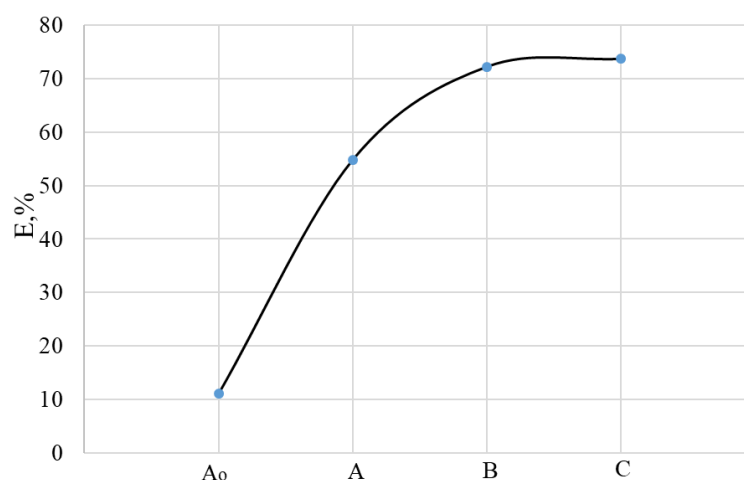


Рис. 2.15 - Зміна пористості зернового шару у процесі обробки залежно від галузі просвічування зернового шару

В області просвічування УЗ далекоміра А спостерігається відмінність від областей В і С, це обумовлюється тим, що в міру очищення зернового вороху

відбувається підвищення його однорідності внаслідок видалення бур'янів і рівномірності псевдозрідження шару зернового вороху.

У процесі очищення зернового вороху відбувається відділення бур'янів зі складу зернової маси. Щільність зернової маси змінюється в міру його руху до виходу із ПСК. Різна щільність зернової маси обумовлює зміну швидкості руху та шляхи проходження зернівки у міру руху до виходу з ПСК. У таблиці 2.2 представлений характер зміни стану зернового шару в міру проходження його змінною опорною сіткою вертикального пневмосепаруючого каналу.

Таблиця 2.2

Зміна стану зернового шару у міру проходження його по змінній опорній сітці вертикального пневмосепаруючого каналу

Показник	Область просвічування УЗ далекоміром		
	А	В	С
$E, \%$	54,8	72,2	73,7
$\rho_{ш}, \text{кг/м}^3$	343,5	211,2	200,2
$v_{зерн}, \text{м/с}$	0,09	0,15	0,16
$L_{зерн}, \text{мм}$	0,14	0,23	0,24

2.5 Висновки до другого розділу

Теоретично обґрунтовано можливість використання фізичних властивостей ультразвукової хвилі для визначення пористості псевдозрідженого шару, що рухається, сипких сільськогосподарських матеріалів.

Розроблено спосіб контролю та забезпечення заданого псевдозрідження шару зернового вороху в ПСК за характером зміни пористості шару в процесі його очищення. Дослідження показали, що подачу зернового вороху можливо встановлювати і контролювати по різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, що пронизують шар зернового вороху, що рухається, отриманих від УЗ далекомірів, встановлених на початку і кінці ПСК. Подачу повітря можна

встановлювати і контролювати по різниці середніх значень довжин шляхів УЗ хвиль, що пронизують шар зернового вороху, отриманих від УЗ далекомірів, встановлених у середині і кінці ПСК.

Розроблено алгоритм роботи та конструкція пристрою оперативного контролю та підтримки заданої пористості шару, що рухається, зернового вороху на основі нового способу. Отже, створюються передумови для підвищення ефективності процесу очищення в цілому.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма наукового дослідження

Відповідно до поставлених завдань прийнято таку програму дослідження:

– розробити і виготовити пристрій оперативного контролю і підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку, принцип дії якого заснований на способі управління подачею зернового вороху і повітря в пневмосепаратор;

– оснастити вертикальний пневмосепаратор розробленим пристроєм оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку. Провести випробування його роботи у лабораторних та виробничих умовах;

– обґрунтувати параметри роботи розробленого пристрою контролю та забезпечення заданої пористості, при яких продуктивність та якість роботи пневмосепаратора відповідають вимогам, що висуваються до машин для вторинного очищення зернового вороху;

– провести техніко-економічну оцінку результатів наукового дослідження.

3.2 Вимірювальні прилади наукового дослідження

У процесі проведення експериментальних досліджень, згідно з прийнятою програмою, необхідно було вимірювати та оцінювати такі величини:

- подачу зернового вороху в пневмосепаратор;
- витрата повітря;
- частоту обертання приводного вала;
- частоту обертання вентилятора;
- довжину шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку, середині і кінці пневмосепаратора;

- забур'яненість оброблюваного матеріалу на вході;
- вологість оброблюваного матеріалу;
- атмосферний тиск повітря;
- продуктивність пневмосепаратора;
- кількість домішок у матеріалі на виході;
- повноту виділення домішок;
- кількість основного матеріалу в осадовій камері;
- електрична потужність, що споживається пневмосепаратором.

Для управління подачею зернового вороху застосовувався частотний перетворювач моделі E2-8300 потужністю 1,5 кВт, управління витратою повітря здійснювалося шляхом зміни частоти обертання вентилятора частотним перетворювачем моделі E2-8300 потужністю 11 кВт. Для визначення залежності частоти обертання вентилятора і частоти обертання приводного вала, хв^{-1} , від показань частотного перетворювача, Гц, використовувався тахометр годинниковий – ТЧ10-Р (рис. 3.1).



Рис. 3.1 - Тахометр часовий, ТЧ10-Р

Для визначення витрати повітря на пневмосепараторі застосовувався багатограничний мікроманометр із похилою трубкою ММН-240 (рис. 3.2). Монтаж пневмометричних трубок в ПСК проводився у відповідності зі схемою, представленою на рисунку 3.3.



Рис. 3.2 - Багатогранний мікроманометр із похилою трубкою ММН-240

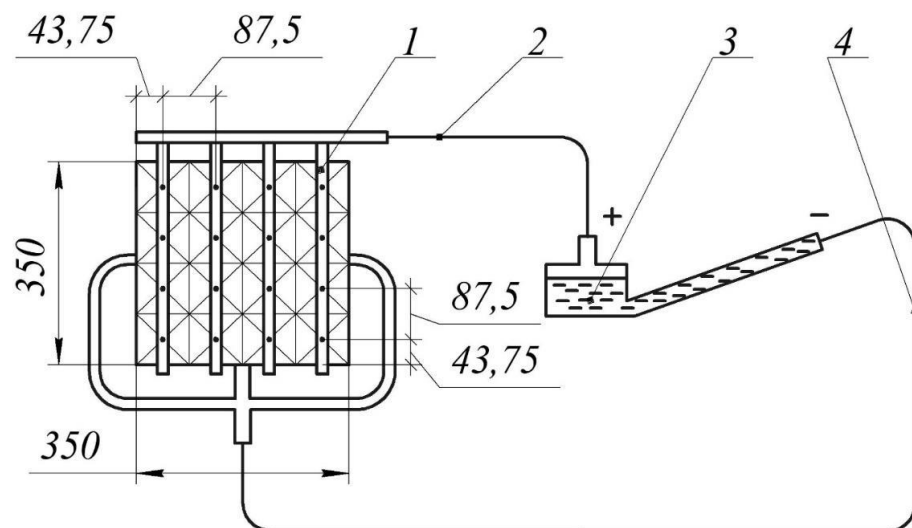


Рис. 3.3 - Схема розташування трубок для вимірювання параметрів повітряного потоку: 1 – пневмометричні трубки; 2, 4 – сполучні гумові трубки; 3 – мікроманометр

Перерахунок показань різниці швидкості повітряного потоку в ПСК, v_B м/с;

$$v_B = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_g}}, \quad (3.1)$$

де P_d – динамічний тиск в пневмосепараторі, Па;

ρ_g – густина повітря, кг/м³.

$$P_{\rho} = 10 \cdot \Delta l_m \cdot K, \quad (3.2)$$

де Δl_m – різниця рівнів за шкалою приладу, мм;

K – сталий множник приладу.

Як УЗ далекомірів використані далекоміри HC-SR04 (рис. 3.4). Принцип дії далекомірів ґрунтується на вимірі часу проходження звукової хвилі від випромінювача до приймача.



Рис. 3.4 - УЗ далекомір HC-SR04

З метою підтвердження теоретичних теорій, викладених у розділі 2, УЗ випромінювач та приймач були розпаяні з плати 1 (рис. 3.5), та встановлені за схемою. Плати з проводами розташовані у коробі 3.

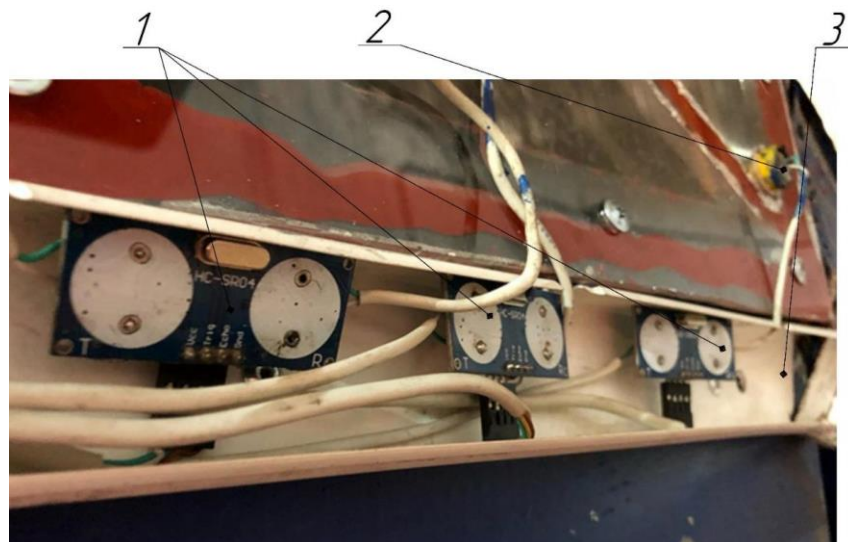


Рис. 3.5 - Розміщення УЗ далекомірів HC-SR04: 1 – плата УЗ далекомірів HC-SR04; 2 – УЗ випромінювач; 3 – короб монтажний

Засміченість оброблюваного матеріалу на вході, кількість домішок у матеріалі на виході, кількість основного матеріалу в осадовій камері визначали згідно з ДСТУ 30483-97. Визначення вологості зерна проводили електронним вологоміром Farmpoint-Digital (рис. 3.6).



Рис. 3.6 - Вологомір Farmpoint-Digital

Для вимірювання атмосферного тиску використовували барометр – анероїд метеорологічний БАММ-1 (рис. 3.7).

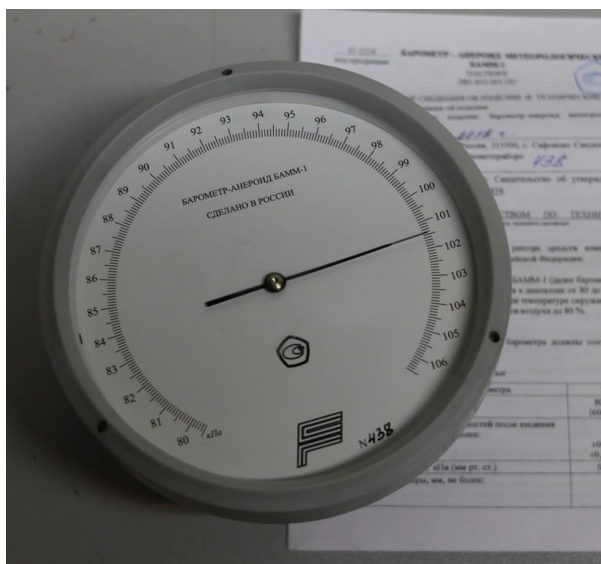


Рис. 3.7 - Барометр БАММ-1

Розрахунок різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку і наприкінці, в середині і наприкінці ПСК, здійснювався відповідно до алгоритму, представленого в розділі 2.3.

Продуктивність пневмосепаратора вимірювалася методом відрізків. Масу зерна визначали на електронних вагах (рис. 3.8), час визначали за електронним секундоміром TORNEO (рис. 3.9).



Рис. 3.8 - Електронні ваги



Рис. 3.9 - Секундомір Torneo

Повноту виділення домішок, E_n , обчислювали відповідно до

$$E_n = 100 - \left(\frac{100 - \mathcal{C}_{\text{оч}}}{100 - \mathcal{C}_{\text{вих}}} \cdot 100 \right), \quad (3.3)$$

де $\mathcal{C}_{\text{оч}}$, $\mathcal{C}_{\text{вих}}$ – відповідно вміст зерна (насіння) основної культури (чистота) у очищеному, вихідному матеріалі, %.

Засміченість оброблюваного матеріалу на вході до пневмосепаратора, кількість домішок у матеріалі на виході з ПСК, кількість основного матеріалу в

осадовій камері визначали в лабораторії (рис. 3.10).



Рис. 3.10 - Визначення засміченості матеріалу в лабораторних умовах

3.3 Методика збору даних для статистичного аналізу числових рядів, отриманих від ультразвукових далекомірів

Відповідно до прийнятої програми наукового дослідження була розроблена конструкційна схема пневмосепаратора зернового вороху, оснащеного пристроєм оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку (рис. 3.11).

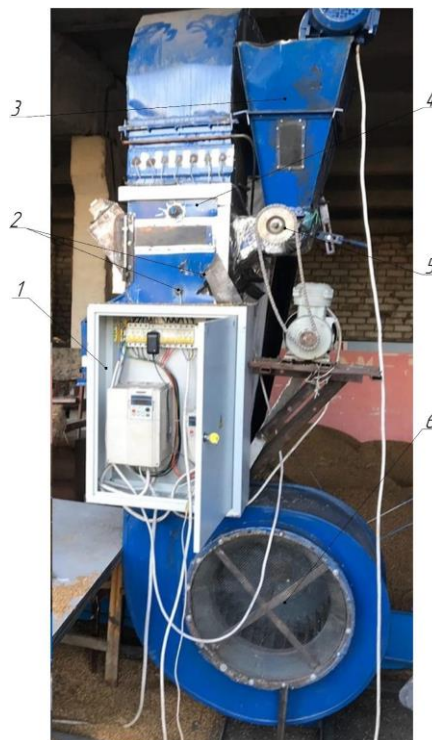


Рис. 3.11 - Дослідний зразок пневмосепаратора зернового вороху: 1 – шафа управління; 2 – УЗ далекоміри; 3 – бункер живильник; 4 – пневмосепаруючий канал; 5 - привід живлячого валика; 6 – вентилятор

Експериментальне дослідження проводилося за такою методикою. Перед початком лабораторних досліджень здійснили підключення персонального комп'ютера до блоку управління пристроєм з метою реєстрації показань УЗ далекомірів для подальшого аналізу отриманих значень. Досліди проводились відповідно до таблиці 3.1. Перед початком кожного досвіду здійснювалося завантаження бункера (рис. 3.11) пневмосепаратора, потім запускався процес очищення. Після встановлення режиму роботи пневмосепаратора протягом 10 с, запускалася програма запису показань на персональний комп'ютер. Тривалість роботи пристрою під час кожного досвіду складала понад 50 секунд. З метою отримання даних із задовільною точністю значень, записаних на персональний комп'ютер від кожного УЗ далекоміра під час кожного досвіду, становила понад 300.

Таблиця 3.1

Порядок проведення лабораторних досліджень

№ досвіду	Частота напруги, підведеного до електродвигуна приводного вала ПСК, Гц	Частота напруги, підведеної до електродвигуна вентилятора ПСК, Гц
1	5	40
2	10	40
3	15	40
4	20	40
5	25	40
6	5	10
7	5	20
8	5	30

Максимальне значення частоти напруги, підведеного до електродвигуна приводного вала, приймали 25 Гц, це обумовлювалося тим, що при частоті більше 25 Гц відбувається пошкодження оброблюваного матеріалу. Мінімальне значення 5 Гц – малою подачею вороху ПСК – менше 0,7 т/год. Кратність зміни частоти струму перетворювача приймали 5 Гц на підставі пошукових дослідів, при цьому подача вороху ПСК змінювалася від 0,19 до 0,67 т/год.

Максимальне значення частоти напруги, підведеного до електродвигуна вентилятора, приймали 40 Гц, це зумовлювалося тим, що при частоті більше 40 Гц спостерігався інтенсивний винесення насіння основної культури в осадову камеру. Мінімальне значення – 10 Гц, при якому не відбувається виділення легких домішок із зернового вороху. Кратність зміни частоти напруги перетворювача приймали 10 Гц.

Отримані значення аналізувалися у програмі STSTGRAPHICS Centurion XV. Були побудовані гістограми розподілу та точкові діаграми розсіювання значень довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку, середині і кінці ПСК. Визначалося математичне очікування, дисперсія випадкової величини.

3.4 Методика визначення впливу періодичності опитування ультразвукових далекомірів на якість оцінки пористості шару зернового вороху

Для виявлення впливу періодичності опитування УЗ далекомірів на якість оцінки пористості шару зернового вороху проведено дослідження відповідно до плану-матриці експерименту (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

План-матриця проведення експерименту

№ досліджу	Частота напруги, підведеного до електродвигуна приводного вала ПСК, Гц	Частота напруги, підведеної до електродвигуна вентилятора ПСК, Гц
1	5	10
2	5	20
3	5	30
4	5	40
5	10	40
6	15	40
7	20	40
8	25	40

Перед початком лабораторних досліджень здійснили підключення

персонального комп'ютера до блоку управління пристроєм з метою фіксації показань УЗ далекомірів і показань частотних перетворювачів, для подальшого аналізу отриманих значень. Потім здійснювали завантаження бункера 3 (рис. 3.11) ПСК та запускали процес очищення. Після візуального визначення робочого режиму ПСК запускали програму запису показань персонального комп'ютера.

Для виявлення впливу періодичності опитування УЗ далекомірів на якість оцінки пористості шару зернового вороху використовувалася вибірка 350 ... 600 значень від кожного УЗ далекоміра для розрахунку середнього арифметичного значення довжин шляхів УЗ хвиль спочатку для всього ряду, потім для рядів, за вибірками, зробленими через 1, 5, 7, 8 і 10 значень від початку ряду, отриманого від кожного УЗ далекоміра. Далі проводився кореляційний аналіз впливу подачі матеріалу на різницю середніх арифметичних значень довжин шляхів ультразвук $L_{2cp}-L_{3cp}$ (за модулем) при періодичності опитування УЗ далекомірів, T_o - 150, 450, 750, 1050, 1020, 1500 мс.

Стандартну помилку коефіцієнта кореляції визначали за формулою:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}, \quad (3.4)$$

де r – коефіцієнт кореляції;

n – чисельність вибірки, тобто. число пар значень, за якими обчислено вибірковий коефіцієнт кореляції.

Критерій суттєвості коефіцієнта кореляції визначали як:

$$t_r = \frac{r}{S_r}. \quad (3.5)$$

Якщо $t_{r\text{факт}} \geq t_{\text{теор}}$, то кореляційний зв'язок істотний. $t_{\text{теор}}$ знаходили по таблиці Стюдента, приймаючи 5% рівень значимості.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати статистичного аналізу рядів, отриманих від ультразвукових далекомірів

З метою підтвердження теоретичних передумов про зміну довжини шляху ультразвукової хвилі при проходженні нею псевдозрідженого шару зернового вороху з різною засміченістю та пористістю згідно з методикою, викладеною в розділі 3.3, був проведений експеримент, в ході якого отримано 24 числових ряди. Кількість значень, записаних на персональний комп'ютер, від кожного УЗ далекоміра під час кожного досліду становила понад 300. На основі отриманих результатів був проведений аналіз характеристик розподілу випадкової величини по кожному числовому ряду на ПК у програмі STSTGRAPHICS Centurion XV. У таблиці 4.1 наведено результати аналізу числових рядів, отриманих відповідно до прийнятої методики – за третім рядком матриці.

Таблиця 4.1

Характеристики розподілу довжин шляхів УЗ хвиль

Показник	Результати аналізу числового ряду, отриманого від УЗ далекоміра, розташованого		
	на початку	посередині	в кінці
Кількість значень	503,0	503,0	503,0
Середнє арифметичне значення, мм	923,83	590,96	480,31
Середньоквадратичне значення, мм	150,81	200,62	157,47
Коефіцієнт варіації, %	16,32	33,95	32,78
Коефіцієнт асиметрії	2,74	8,51	18,60
Коефіцієнт ексцеса	0,82	-0,65	14,55

У ході аналізу отриманих результатів спостерігається закономірність зменшення середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів на початку, середині і наприкінці пневмосепаратора, та закон

розподілу випадкової величини (рис. 4.1-4.6). Це відбувається з причин збільшення пористості шару зернового вороху та його очищення від легких домішок. Розподіл випадкової величини відмінно від нормального, оскільки коефіцієнти асиметрії та ексцесу поза діапазоном від -2 до +2. У міру збільшення пористості шару та його очищення спостерігається збільшення частоти появи довжин шляхів УЗ із меншою величиною. Так на початку очищення пристроєм фіксується з переважною абсолютною частотою вибірки 150 довжина шляху УЗ хвилі від 750 до 1000 мм (рис. 4.1 і 4.2), в кінці очищення переважає довжина шляху УЗ хвилі 350 ... 420 мм з абсолютною частотою вибірки – 305 (4.5-4.6).

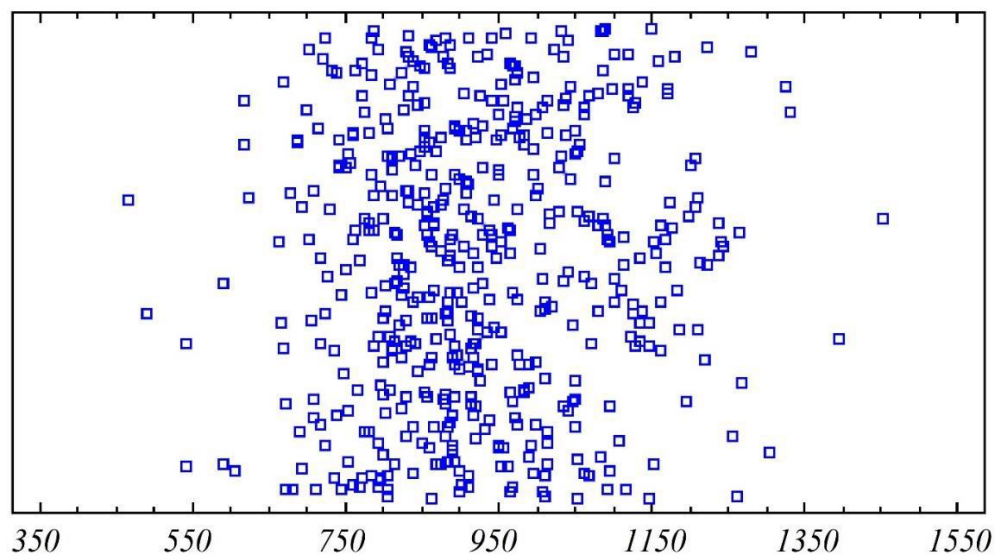


Рис. 4.1 - Точкова діаграма розсіювання довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого на початку ПСК

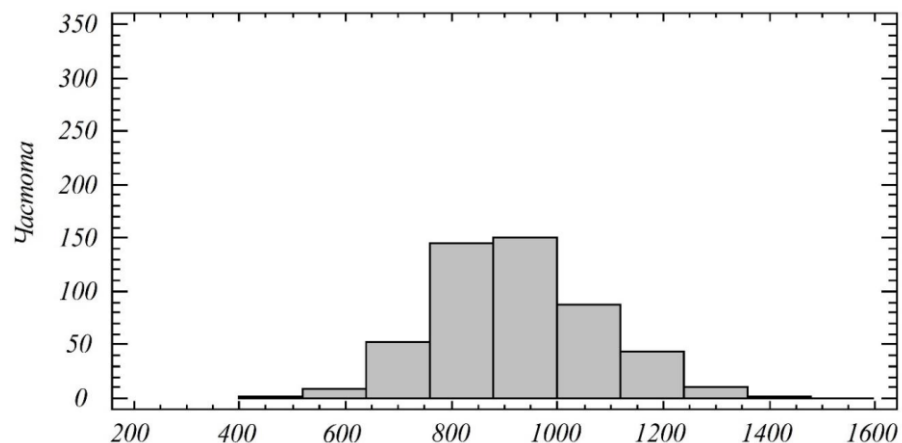


Рис. 4.2 - Гістограма абсолютних частот довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого на початку ПСК

На рисунках 4.1 і 4.2 видно, що з найбільшою частотою реєструються довжина шляху УЗ хвиль 750...1000 мм.

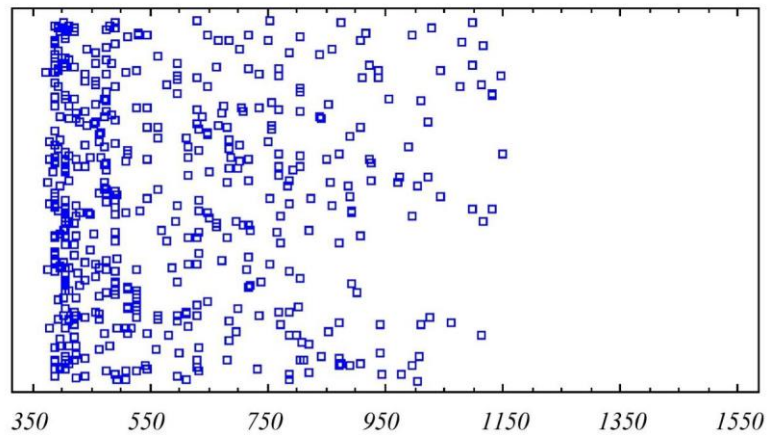


Рис. 4.3 - Точкова діаграма розсіювання довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого посередині ПСК

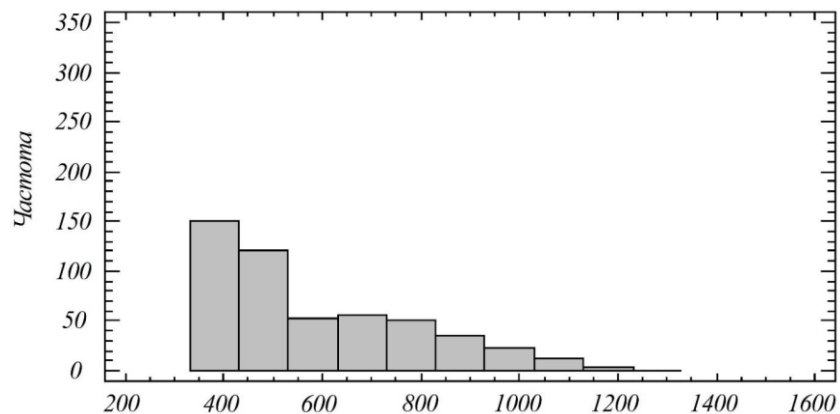


Рис. 4.4 - Гістограма абсолютних частот довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого посередині ПСК

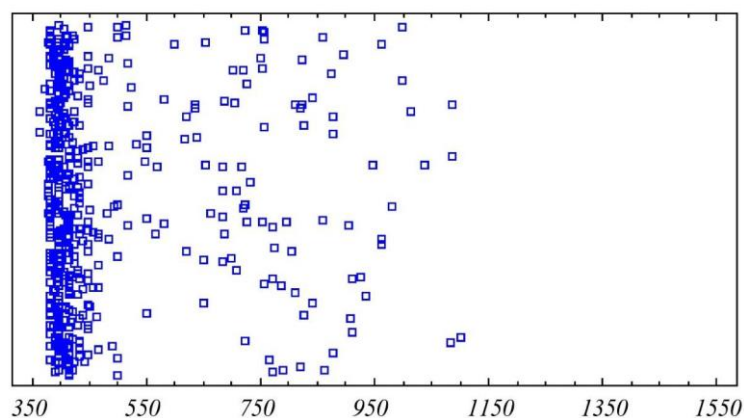


Рис. 4.5 - Точкова діаграма розсіювання довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого в кінці ПСК

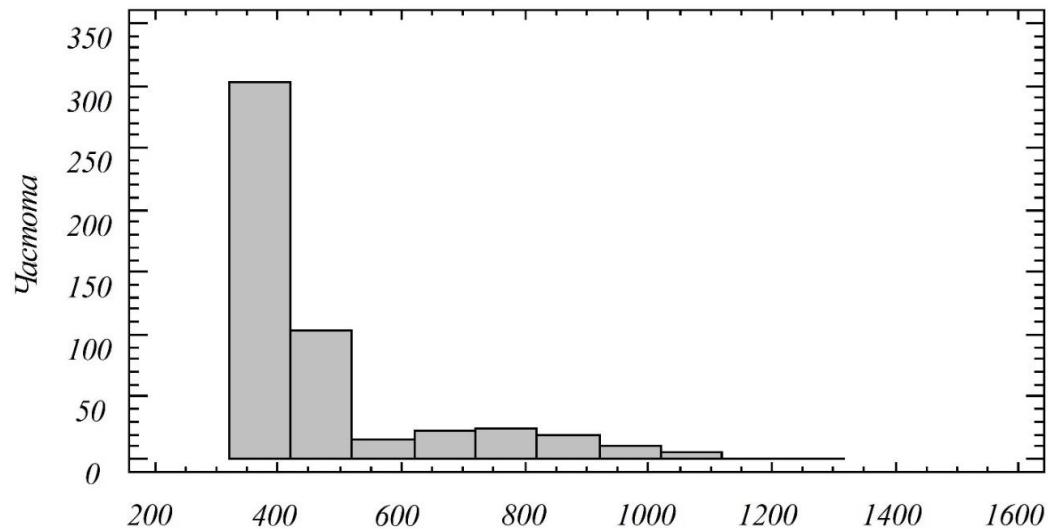


Рис. 4.6 - Гістограма абсолютних частот довжин шляхів УЗ хвиль, мм, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого в кінці ПСК

З метою пошуку зв'язку між значеннями довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку, середині і кінці ПСК, від частоти обертання приводного вала і вентилятора був проведений кореляційний аналіз, результати якого представлені в розділі 2.

4.2 Результати кореляційно-спектрального аналізу випадкового процесу зміни пористості зернового вороху

Згідно з методикою був проведений аналіз вибірки величини довжин шляхів УЗ хвиль, отриманих від УЗ далекомірів, розташованих на початку, середині і кінці, в режимі сепарації зернового вороху при частоті напруги, підведеної до електродвигуна вентилятора 20 Гц, і частоті напруги, підведеного до електродвигуна приводного вала 5 Гц. Відповідно до отриманих даних були побудовані графіки залежності $\rho_l(\tau)$ та апроксимовані функцією 3.11 (рис. 4.7 - 4.9). Згладжуюча крива, отримана в результаті апроксимації, представлена пунктиром.

З графіків видно, що у випадковому процесі псевдозрідження присутні приховані регулярні періодичні складові, кореляційна функція коливається біля осі τ і не згасає. Час спаду кореляційної функції τ_0 характеризує тісноту кореляційного

зв'язку. Зв'язок між частинками матеріалу тісніший на початку ПСК, тобто шар більш структурований, і слабшає в міру проходження шару вздовж опорної сітки ПСК, переходить у хаотичний стан, при цьому кореляційний зв'язок зменшується з 0,90 до 0,18 с.

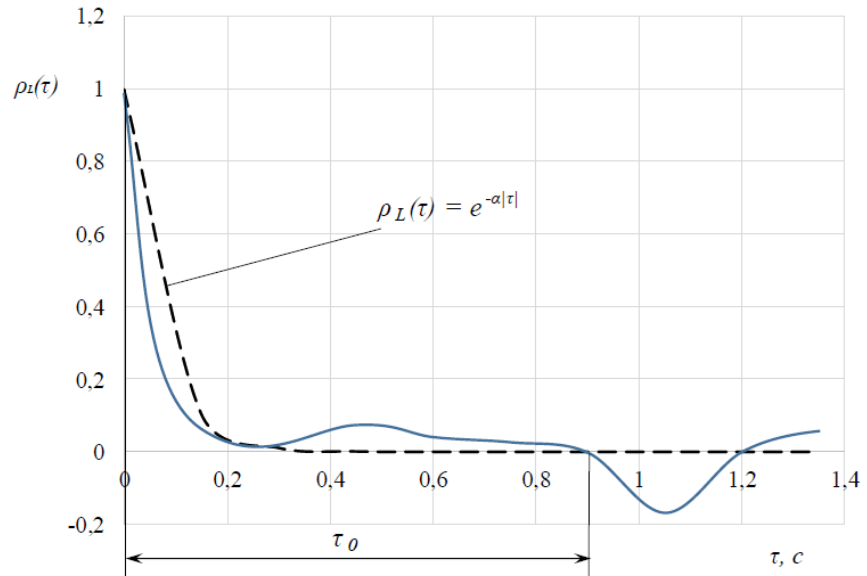


Рис. 4.7 - Залежність $\rho_L(\tau)$, отримана під час обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого на початку ПСК

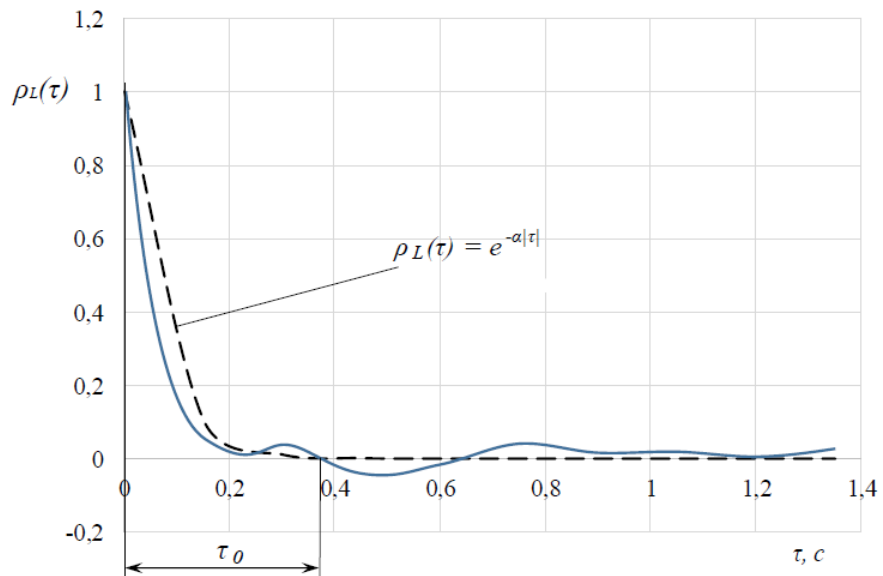


Рис. 4.8 - Залежність $\rho_L(\tau)$, отримана під час обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого посередині ПСК

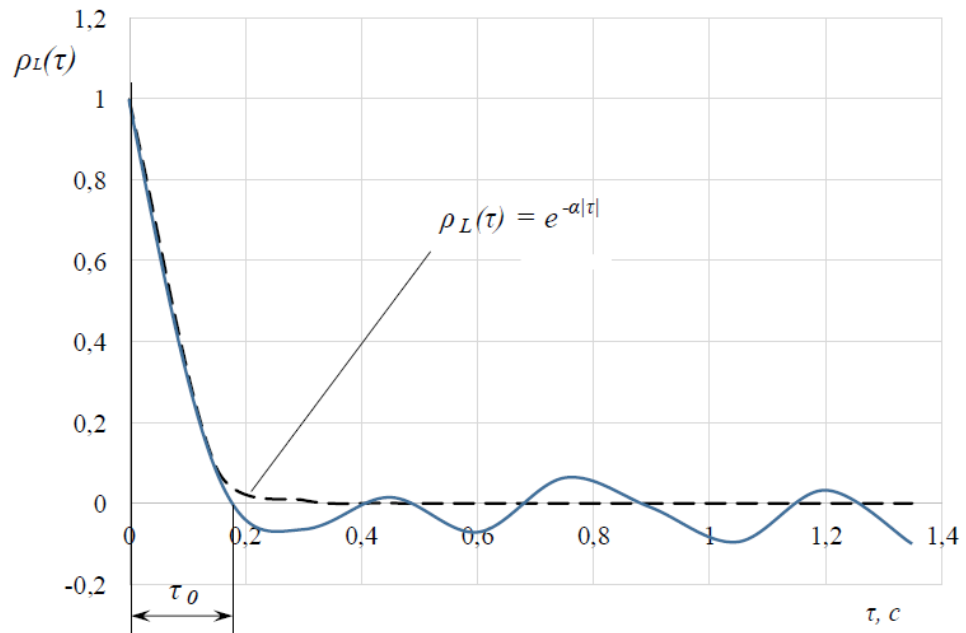


Рис. 4.9 - Залежність $\rho_L(\tau)$, отримана під час обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого в кінці ПСК

При визначенні спектральної густини були отримані дані, представлені на рисунках 4.10-4.12 та у таблиці 4.2.

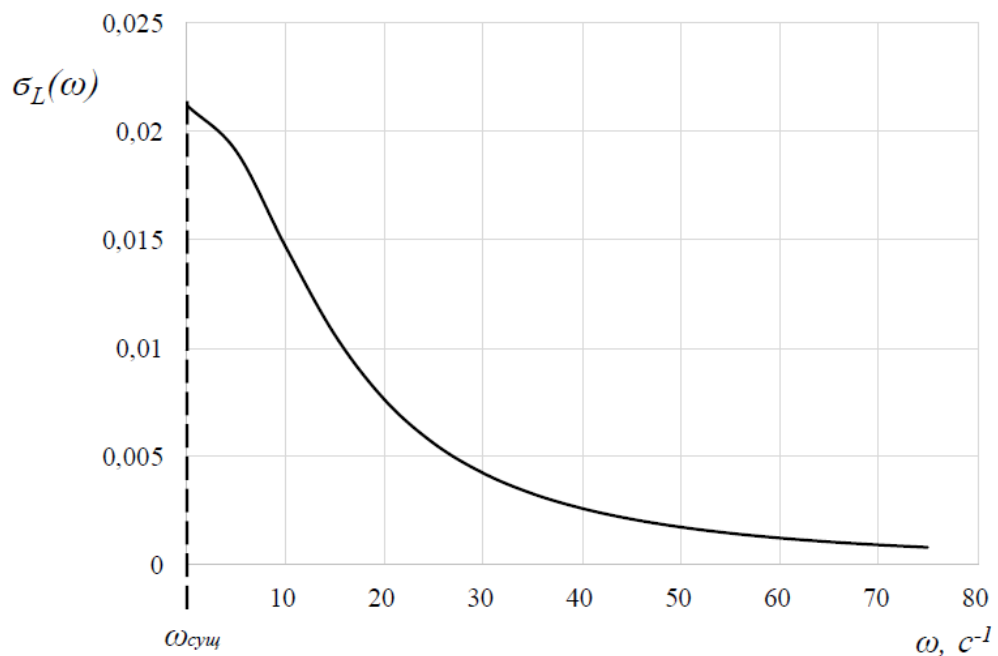


Рис. 4.10 - Залежність нормованої спектральної щільності від частоти зміни довжини шляху УЗ хвилі, отримана в ході обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого на початку ПСК

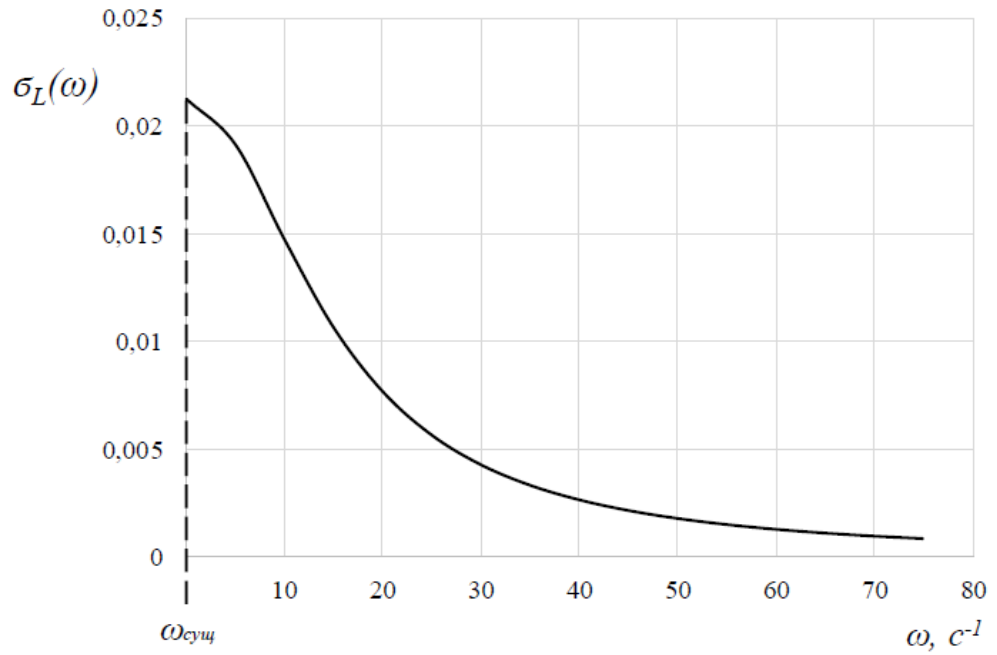


Рис. 4.11 - Залежність нормованої спектральної щільності від частоти зміни довжини шляху УЗ хвилі, отримана в ході обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого посередині ПСК

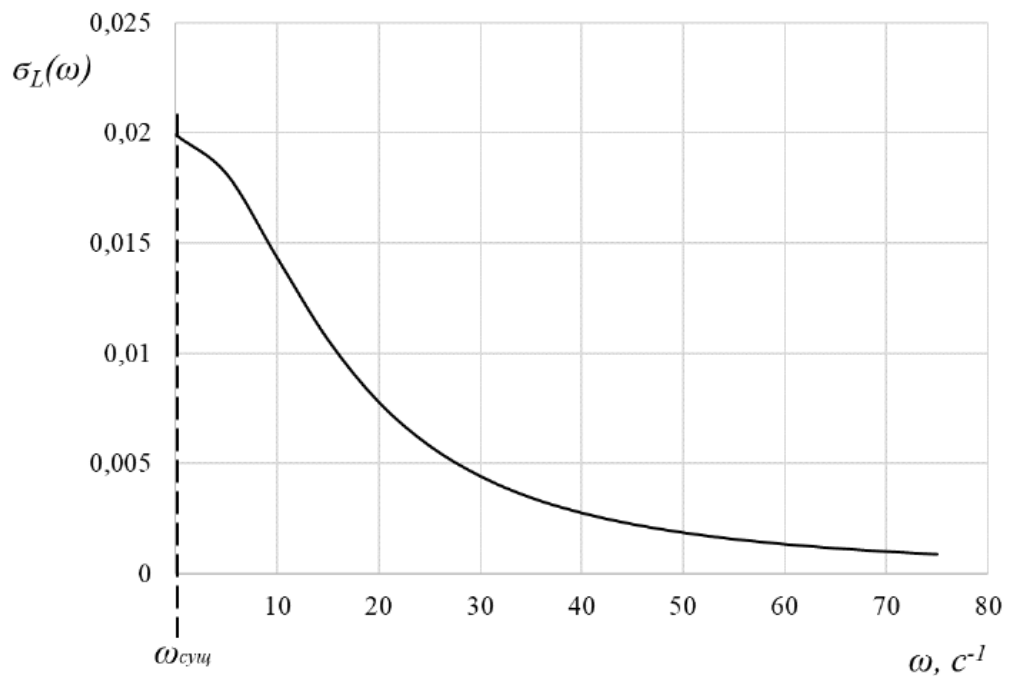


Рис. 4.12 - Залежність нормованої спектральної щільності від частоти зміни довжини шляху УЗ хвилі, отримана в ході обробки даних від УЗ далекоміра, розташованого в кінці ПСК

Таблиця 4.2

Параметри спектральної щільності, отримані в ході аналізу даних від УЗ
далекомірів ПСК

Показник	Для значень, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого на початку ПСК	Для значень, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого на посередині ПСК	Для значень, отриманих від УЗ далекоміра, розташованого на в кінці ПСК
Істотна частота, ω_i	0,021	0,021	0,020
Ширина спектру $\Delta\omega$	47,12	47,12	50,27

Згідно з значенням, можна встановити, що випадкові процеси широкосмугові для значень, отриманих від усіх УЗ далекомірів, так як їх спектральна щільність не зосереджена в відносно вузькому діапазоні частот близько істотної частоти ω_i . Пористість шару значно коливається щодо середнього значення у процесі його очищення.

4.3 Техніко-економічна ефективність

Витрати виготовлення пристрою Z_6 , грн. визначаються за формулою [10]:

$$Z_6 = C_{cd} + C_{nd} + C_{no}, \quad (4.1)$$

де C_{cd} – вартість стандартних деталей, що купуються, грн.;

C_{nd} – вартість нестандартних деталей, що виготовляються, грн.;

C_{no} – вартість програмного забезпечення, грн., приймаємо 1000 грн.

Потужність частотних перетворювачів прийняли, виходячи з аналізу енергоспоживання аналогічних пневмосепараторів:

Таблиця 4.3

Потужність аналогічних пневмосепараторів

Назва пневмосепаратора	Споживча потужність, кВт
СП-2Ф	2,75
СП-2У-Р	3,4

Вартість деталей, що виготовляються $C_{нд}$ визначається за формулою:

$$C_{нд} = C_{мат} + C_{рв}, \quad (4.2)$$

де $C_{мат}$ – вартість матеріалів, грн.;

$C_{рв}$ – вартість роботи по виробництву, грн.

Вартість матеріалів розраховуються за такою формулою:

$$C_{мат} = \sum_{i=1}^n QЦ, \quad (4.3)$$

де n – кількість видів матеріалу;

i – вид матеріалу;

Q – маса матеріалу, кг;

$Ц$ – вартість матеріалу, грн./кг.

Таблиця 4.4

Вартість заготовок і матеріалів

Назва	Загальна вартість, грн.
Витратні матеріали (припой, флюс, фоторезист, кислоти для витравлення)	750
Всього	750

Вартість робіт з виготовлення пристрою приймемо виходячи з фактично витраченого часу на виготовлення та середнього грошового доходу населення Вінницької області за 2022 рік, визначеного за допомогою головного управління статистики у Вінницькій області.

На виготовлення пристрою було витрачено два робочі дні, по 8 годин. Середня заробітна плата дорівнює 15 472 грн на місяць.

$$C_p = \frac{15472}{t_{mp}} \cdot 16 = 1574,2 \quad (4.3)$$

де t_{mp} – кількість робочих годин в місяць.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Застосування розробленого способу контролю та забезпечення заданої пористості шару зернового вороху на основі УЗ в ПСК дозволяє проводити якісне очищення зернового вороху з фізико-механічними властивостями зернового потоку, що змінюються. Це забезпечується тим, що швидкість поширення УЗ хвиль у зерновому шарі багаторазово вища, ніж швидкість руху окремо взятих компонентів псевдозрідженого шару.

Періодичність опитування УЗ далекомірів 150 мс забезпечує своєчасне реагування системи контролю та забезпечення заданої пористості шару зернового вороху на зміну рівня псевдозрідження потоку зернового вороху. Принцип роботи системи дозволяє здійснювати незалежне регулювання витрати повітряного потоку та подачу зернового вороху до ПСК.

Активна потужність, що споживається пневмосепаратором зернового вороху залежно від режиму сепарації, змінюється від 0,93 до 1,45 кВт. Блок управління пристроєм споживає 2,5 Вт незалежно від режиму роботи ПСК, що становить 0,27 ... 0,17% від загальної споживаної активної потужності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено спосіб контролю та забезпечення заданого псевдозрідження шару зернового вороху в ПСК за характером зміни пористості шару зернового вороху в процесі його очищення. Дослідження показали, що подачу зернового вороху можливо встановлювати і контролювати по різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, що пронизують шар зернового вороху, що рухається, отриманих від УЗ далекомірів, встановлених на початку і кінці ПСК. Подачу повітря можна встановлювати і контролювати по різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль, що пронизують шар зернового вороху, що рухається, отриманих від УЗ далекомірів, встановлених в середині і кінці ПСК.

2. Визначено раціональні параметри роботи розробленого пристрою контролю та забезпечення заданої пористості шару зернового вороху у пневмосепараторі зернового вороху. Періодичність опитування УЗ далекомірів - 150 мс; вибірка для розрахунку різниці середніх арифметичних значень довжин шляхів УЗ хвиль значень довжин шляхів УЗ хвиль – 50 значень.

3. Розроблено алгоритм роботи та конструкція пристрою оперативного контролю та підтримки в заданому стані шару зернового вороху, що рухається, за допомогою ультразвуку. Пристрій містить мікроконтролерний блок управління з клавіатурою управління, роз'єми підключення блоку живлення, USB інтерфейс, роз'єм підключення частотних перетворювачів, графічний LCD дисплей, УЗ дальноміри та частотні перетворювачі.

4. Активна потужність, що споживається пневмосепаратором зернового вороху залежно від режиму сепарації, змінюється від 0,93 до 1,45 кВт. Блок управління пристроєм споживає 2,5 Вт незалежно від режиму роботи ПСК, що становить 0,27 ... 0,17% від загальної споживаної активної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аренков А. Б. Ультразвукова обробка матеріалів : монографія. Машинобудування. 1971. 168 с.
2. Бандура В. М., Курило В. Л., Серета Л. П., Пришляк В. М., Швець Л. В. Методичні рекомендації до написання й оформлення магістерських робіт магістрантами денної та заочної форм навчання інженерно-технологічного факультету спеціальності 208 «Агроінженерія» галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство». Вінниця: ВНАУ, 2019. 39 с.
3. Берник І. М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки*. 2014. Вип. 45. Том 2. С. 129–133.
4. Берник І. М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. №3. С. 121–126.
5. Берник І. М. Інтенсифікація технологічних процесів обробки харчових середовищ. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 3. С. 109–115.
6. Берник П. С., Стоцько З. А., Паламарчук І. П. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. Київ, 2008. 336 с.
7. Впровадження методів контролю генетично модифікованих компонентів у насіннєвому матеріалі сільськогосподарських культур та стандартизація їх нормативного забезпечення / Я. В. Пірко та ін. *Наука та інновації*. 2009. № 2. С. 38–49.
8. Гевко Р. Б. Теоретичне обґрунтування параметрів переміщення сипкого матеріалу робочим органом скребкового транспортера – змішувача по криволінійній трасі. *Вісник інженерної академії України*. 2013. № 1. С. 119–125.
9. Горбенко О. А. Результати досліджень механіко-технологічних властивостей насіння баштанних культур. *Праці ТДАТУ*. 2016. Вип.16. С. 178–187.
10. Гунько І. В. Присяжнюк О. І. Бурдейна Л. І. Теоретичні основи використання економіко-статистичних методів у наукових дослідженнях студентської молоді вищих навчальних закладів аграрного профілю. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2018. № 1. С. 33–43.

11. Жемела Г. П., Шемавньов В. І., Олексик-Полтава О. М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва : підручник. 2003. 420 с.
12. Зберігання і переробка продукції рослинництва / Подпряттов Г. І. та ін. Київ : Мета, 2002. 495 с.
13. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П. Комплексні експериментальні дослідження виготовлення кормової суміші для тваринництва. *Збірник наукових праць ЛНТУ. Перспективні технології та прилади*. 2016. № 9. С. 237–244.
14. Котов Б. І., Спирін А. В., Солоня О. В., Калініченко Р. А. Стан і перспективи теплової і механічної переробки зернової сировини на корм. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №4. С.139–142.
15. Любін М. В., Токарчук О. А., Літинський С. Д. Обґрунтування параметрів робочого органу для автоматизованого процесу дозування концентрованих кормів. *Збірник наукових праць ВНАУ*. Вип. 2. С. 170–174.
16. Машина та обладнання для тваринництва / Ревенко І. І. та ін. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 567 с.
17. Механічні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва. Том 1.: Навчальний посібник / Паламарчук І. П. та ін. Львів : «Львівська політехніка», 2004. 336 с.
18. Назаренко І. І., Берник І. М. Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв : навчальний посібник. Київ, 2013. 544 с.
19. Основи стандартизації, управління якістю та сертифікація продукції рослинництва / Подпряттов Г. І. та ін. Луцьк : Терен, 2011. 752 с.
20. Осокіна Н. М., Гайдай. Г. С. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва : підручник. Умань, 2005. 614 с.
21. Пазюк В. М. Теплонасосні сушильні установки в процесах сушіння зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №2. С.53–57.
22. Паладійчук Ю. Б., Тарасюк Ю. М. Моделювання технологічного процесу змішування зернових сумішей гвинтовим змішувачем. *Збірник наукових праць ВНАУ. Технічні науки*. 2014. Вип. 2. С. 92–97.
23. Паламарчук І. П., Зозуляк І. А., Липовий І. Г. Аналіз параметрів впливу

на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. *Наукові праці ОНАХТ. Серія Технічні науки*. 2014. Вип. 45. Том 2. С. 124–128.

24. Подпряттов Г. І., Скалецька Л. Ф., Сеньков А. М. Зберігання і переробка продукції рослинництва. Київ : Центр інформаційних технологій, 2010. 495 с.

25. Подпряттов Г. І., Скалецька Л. Ф., Сеньков А. М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва. Практикум : навч. посібник. Київ : Вища освіта. 2004. 272 с.

26. Полевода Ю. А. Оцінка адекватності математичної моделі. *Перспективи розвитку сільськогосподарської техніки : 2013* : матеріали VII науково-технічної конференції. Вінниця : ВНАУ, 2013. С. 179–180.

27. Романов А.М., Зозуляк І. А. К вопросу о сепарации примесей на фрикционных сепараторах. *Вибрации в технике и технологиях*. 1995. №1. С. 57–58.

28. Сайт Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського – Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua>.

29. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва / Жемела Г. П. та ін. Дніпропетровськ, 2005. 248 с.

30. Цуркан О. В. Нечипоренко С. А., Близнюк М. Я. Сучасні способи сушіння зернових матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 1. С. 130–134.

31. Чернілевський Д. В., Павленко В. С., Іщенко Л. В. Лабораторний практикум з деталей машин та основ конструювання : навч. посібник. Вінниця, 1995. 144 с.

32. Янович В. П., Купчук І. М., Полевода Ю. А., Михайловська М. А. Створення фото аналітичного методу експрес-оцінки вихідної однорідності сипких матеріалів. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2014. Вип. 1 (84). С. 182–187.

33. Akbari Mousavi, Feizi H., Madoliat R. Investigations ultrasonic vibrations в extrusion process. *Journal of Materials Proc. Tech*. 2007. P. 187–188, 657–661.

34. Lin H.-Y. Detection of Genetically Modified Soybeans and Maize by the Polymerase Chain Reaction Method. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2000. Vol. 8. P. 200–207.