

УДК 631.362.5:621.867.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.147-163](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.147-163)

Е. Б. Алієв, ст. досл., д-р техн. наук, О. А. Черній

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua*

Аналіз віброживильників для транспортування та дозування насіння в системі їх автоматичного фенотипування

В роботі приведено актуалізацію використання віброживильників в сучасних технологічних лініях обробки та підготовки насіння сільськогосподарських культур. Наведені результати наукових досліджень процесу транспортування та дозування частинок сипкого вантажу по робочому органу віброживильника. Описано залежність якісних характеристик роботи віброживильників від впливу таких параметрів як гранулометричний склад часток вантажу, висоти транспортуемого шару вантажу, нахилу робочого жолоба чаші живильника до горизонту, кута нахилу вектора збурюючої сили, траєкторії руху робочого органу віброживильника та ін. Наведено аналіз існуючих конструкцій бункерних спіральних вібраційних живильників.

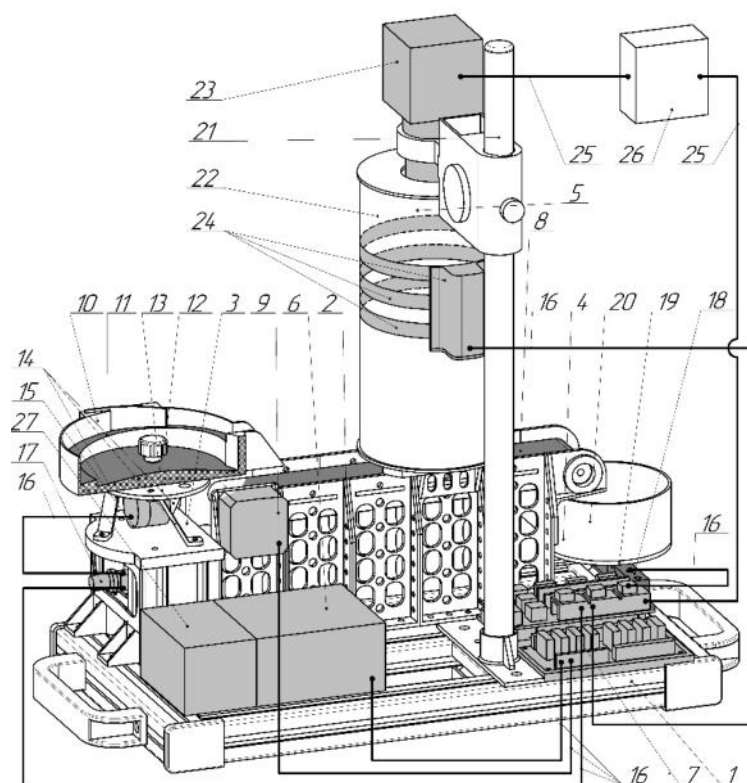
фенотипування насіння, вібраційний живильник, насіннева суміш, параметри вібрації, робочий орган віброживильника, пружний елемент віброживильника, вібропривод, траєкторія руху робочого органу

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку аграрної галузі вимагають впровадження високоточних, автоматизованих технологій контролю якості насінневого матеріалу культурних рослин на етапі їх селекції [1]. Одним із ключових напрямів у цьому контексті є автоматичне фенотипування насіння за допомогою систем машинного зору [2, 3]. Ефективність таких систем значною мірою залежить від точного та стабільного транспортування і дозування насіння, що забезпечується відповідними технічними засобами – зокрема, віброживильниками.

Віброживильники мають ряд конструктивних і функціональних переваг, які роблять їх перспективними для використання в автоматизованих лініях фенотипування [4]. Проте їх ефективність істотно залежить від характеристик насінневого матеріалу, режимів вібрації та параметрів конструкції. Нерівномірність подачі або неправильне позиціонування насіння ускладнює роботу візуальних сенсорів та знижує достовірність зібраних даних. Це вимагає детального аналізу типів віброживильників, принципів їх дії та параметрів, що впливають на рівномірність подачі.

Таким чином, дослідження, присвячене аналізу віброживильників у контексті транспортування та дозування насіння для систем автоматичного фенотипування, є вкрай актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно попередніх досліджень [3,4] розроблена конструктивна-технологічна схема системи автоматичного фенотипування насіння сільськогосподарських культур, яка представлена на рис. 1. У складі системи автоматичного фенотипування насіння важливу роль відіграє блок подачі насіння, виконаний у вигляді віброживильника. Він складається з чаші з гвинтоподібною доріжкою, змонтованої на вібруючій поверхні з вібродвигуном і пружними пластинами. Така конструкція забезпечує рівномірну подачу насіння для точного позиціонування на стрічковому транспортері перед фотофіксацією. Керування вібродвигуном здійснюється через широтно-імпульсний модулятор, підключений до блоку керування. Оптимізація параметрів віброживильника дозволяє досягти стабільного потоку насіння, що необхідно для точного зчитування морфологічних характеристик за допомогою системи машинного зору.



- 1 – рама; 2 – стрічковий транспортер; 3 – блок для подачі насіння; 4 – блок для вимірювання маси; 5 – блок фотофіксації; 6 – блок живлення; 7 – блок керування; 8 – стрічка; 9 – кроковий двигун; 10 – чаша; 11 – гвинтоподібна доріжка; 12 – гвинт; 13 – віброюча поверхня; 14 – пружні пластини; 15 – вібродвигун; 16 – електричні проводи; 17 – широтно-імпульсний модулятор; 18 – тензодатчик; 19 – пластина; 20 – бокс; 21 – штатив; 22 – світлонепроникна труба; 23 – фотокамера; 24 – RGB-світлодіоди; 25 – USB-інтерфейс; 26 – персональний комп'ютер; 27 – акумулятор

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема системи автоматичного фенотипування насіння сільськогосподарських культур

Джерело: [3, 4]

Для підвищення ефективності функціонування системи автоматичного фенотипування насіння є потреба в дослідженнях взаємодії часток рухомого вантажу з віброючим робочим органом для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів вібротранспортера.

Пошуком оптимальних параметрів процесу вібротранспортування різного роду сипких вантажів присвячено наукові роботи [6-20].

В роботі [6] досліджувалась швидкість транспортування мінеральної сировини (часток кварцу з середнім діаметром частинок $0,09 \div 0,106$ мм) по поверхні лотка віброживильника покритого гумовою футерівкою спеціальної конструкції (продольний переріз футерівки, має зубчасту поверхню з висотою зубців 0,4 мм та кутом нахилу твірних поверхонь зубців до горизонту 63° та 26°). Експериментально встановлено, що при параметрах вібрації (частота 50 Гц, кут підйому лотка 5°) вантаж не рухається при діапазоні амплітуд до 0,3 мм, а при збільшенні амплітуди коливань від 0,3 до 1,0 мм швидкість руху вантажу стрімко зростає. При сталій амплітуді коливань 0,6 мм та куту підйому лотка 5° відсутність руху вантажу відмічено в діапазоні частот $0 \div 30$ Гц. В діапазоні $30 \div 65$ Гц швидкість транспортування зростає повільно, а від 65 до 70 Гц відбувається стрімке зростання швидкості транспортування. При збільшенні кута

підйому лотка від 5° до 10° при частоті 50 Гц та амплітуді 0,6 мм, швидкість транспортування стрімко спадає до нуля.

В праці [7] чисельно проводився аналіз параметрів роботи вертикальних спіральних віброконвеєрів. Шляхом введення в теоретичні залежності контролера нелінійної пропорційної похідної, отримані оптимізовані параметри вібрації віброконвеєра.

Чисельне моделювання руху частинки по вібруючій поверхні з футерівкою досліджувалось в роботі [8]. Створені моделі часток вантажу у вигляді сфер з середнім радіусом 0,5 мм. Результати моделювання руху часток показали, що факторами, які найбільше впливають на швидкість транспортування є статичний коефіцієнт тертя та коефіцієнт тертя кочення часток по футерівці конвеєра. Моделювання руху частинок показало сталість швидкості руху часток по поверхні футерівки (від часу 1,5 с до 6,5 с частинки рухались зі сталою швидкістю 11,85 мм/с. Також відмічено, що зі збільшенням значення Y_h (відношення діаметру часток до висоти зубців футерівки) від 0,4 до 1,0 швидкість транспортування часток знижується з 12 до 1 мм/с.

Вертикальні вібраційні конвеєри завдяки своїм перевагам, активно використовуються не тільки як транспортуючі машини, а й машини для додаткової обробки рухомого вантажу. Так в роботі [9] автори обґрунтовують можливість використання вертикального віброконвеєра як машини для сушіння вологого гранульованого органічного матеріалу. Результатом дослідження є розраховані параметри вібросушарки, обґрунтовані режими сушіння, визначено шляхи для подальшого вдосконалення ефективності роботи сушильних агрегатів вібраційного типу. Варіант використання вертикальних вібраційних конвеєрів для дезінфекції та пастеризації зерен ячменю та пшеничного борошна висвітлено у роботах [10,11]. Було досліджено вплив параметрів віброприводу (кут нахилу осі вібромотора до горизонту, частота обертання ротора) на час перебування транспортуємого матеріалу в лотку конвеєра. Встановлено, що для зерен ячменю найбільша стабільність тривалості високотемпературної обробки (як фактора якості дезінфекції) відбуватиметься при кутах нахилу осі ротора вібромотора до горизонту 20° та 30° та частоті обертання ротора 600 хв^{-1} . Для борошна було встановлено, що тривалість транспортування, а отже і дезінфекції зменшується зі збільшенням кута нахилу осі ротора вібромотора до горизонту. При куті нахилу 20° середній час становив 545 с, тоді як при 40° – 222 с. Частота обертання ротора вібромотора також впливає на час транспортування. Так при збільшенні частоти обертання ротора з 600 хв^{-1} до 740 хв^{-1} відбувається зменшення часу транспортування борошна з 320 с до 260 с. В обох дослідженнях відмічається, що час транспортування і ячменю і борошна змінюється протягом деякого часу роботи вібротранспортера. Серед ймовірних причин, що сприяють цьому явищу, автори називають покриття поверхні робочого органу вібротранспортера в процесі роботи шаромпилевидних часток транспортуємого матеріалу, які зумовлюють зменшення швидкості транспортування. Також досліджувалось вплив статичного струму, що виникає між частинками вантажу та поверхнею лотка при їх взаємному терті. Найкращим способом відновлення продуктивності вібротранспортера, за дослідженнями авторів, є механічна очистка лотка скребком та промивання водою. Роботи по оптимізації роботи цих дезінфікуючих установок продовжуються.

Ще однією перевагою вертикальних вібраційних конвеєрів є те, що їх принцип роботи і конструкція дозволяє їх використовувати як бункери для сировини, а вібрація забезпечує регульовану швидкість подачі сировини для подальшої переробки. Тобто, завантаживши сипкий вантаж в лоток конвеєра та подаючи вібрацію можна дозувати вихід сипкого вантажу з лотка. Математичне обґрунтування нової конструкції

бункерного живильника (в літературі можна зустріти таку назву вертикальних вібраційних конвеєрів) досліджувалось в роботі [12]. Автори пропонують модель руху робочого органу по еліптичній траєкторії. При цьому в горизонтальній площині створювати вібрацію електромагнітним приводом, а вертикальну вібрацію – за рахунок кінематичних збуджувачів у вигляді нахилених до горизонту плоских пружин. Експериментально визначено коефіцієнт пружності пружин та коефіцієнт дисипації при яких відмічається оптимальний зсув фаз між вертикальною та горизонтальною амплітудами коливань робочого органу бункера живильника.

Вплив на швидкість руху вантажу в вертикальних вібраційних конвеєрах залежно від виду траєкторії коливань робочого органу досліджувався в роботі [13]. Експериментально підтверджено, що для транспортування вантажів, які мають низький коефіцієнт тертя, потрібно створювати еліптичні коливання робочого органу. А горизонтальна складова вібраційної сили найбільше впливає на швидкість руху вантажу в вертикальному віброконвеєрі. Змінюючи нахил осі ротора вібромотора та еліптичність траєкторії, можна регулювати не тільки швидкість руху різних вантажів, а й подовжувати довговічність лотка конвеєра при його абразивному зношуванні.

Основні шляхи збільшення продуктивності вертикальних вібраційних конвеєрів при транспортуванні гранульованих сипких вантажів висвітлено в статті [15]. Автори представили дослідну установку з вібраційним приводом оригінальної конструкції. Регулюючи розміщення дебалансів, можна забезпечити рух робочого органу вібротранспортера по прямій, коловій та еліптичній траєкторіям. Використовуючи у якості імітації гранульованого сипкого вантажу скляні кульки з діаметром 1 мм в кількості 300 000 шт, було встановлено, що їх найбільша швидкість транспортування виникає при лінійній траєкторії руху робочого органу (близько 90% амплітудного значення швидкості руху жолоба), а при коловій траєкторії руху максимально отрималось близько 50% амплітудного значення швидкості руху жолоба. Також найоптимальніше вібромашина працювала з значенням коефіцієнту режиму роботи інерційного віброконвеєра $\Gamma = 3,0$ при куті нахилу лінії сил вібрації до горизонту 31° . При збільшенні статичного коефіцієнту тертя вантажу (до 1,0) та збільшенні кута нахилу лінії коливання до 60° , збільшується значення (до 0,62) мінімального коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра, при якому починає рух потік вантажу по жолобу. А при коловій траєкторії руху жолоба при однакових параметрах коефіцієнтів тертя вантажу та куті нахилу векторів сили вібрації для руху вантажу потрібно забезпечувати більше значення коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра ніж при лінійній траєкторії. Важливим результатом досліджень є вплив товщини шару транспортуємого матеріалу на швидкість його переміщення. Встановлено, що швидкість руху гранульованого вантажу зростає до значення висоти шару, що дорівнює десятиєм діаметрам часток вантажу. Цікавим є дослідження авторів щодо появи при вібротранспортуванні сипкого вантажу хвиль з псевдозрідженим шаром частинок вантажу. Встановлена емпірична залежність довжини хвилі сипкого вантажу з псевдозрідженим шаром при зміні коефіцієнту Γ у вигляді $\lambda(\Gamma) = 1.3 \text{ cm} + 20 \text{ cm} \cdot \Gamma^{-1.9}$ (при сталій амплітуді коливань 1,47 мм). Також експерименти показали, що найбільшою швидкістю руху жолоба вібраційного конвеєра при якій вантаж переходить в псевдозріджений стан становить 0,2 м/с (при діапазоні частот коливання 20-60 Гц). Перехід частинок вантажу в псевдозріджений стан відбувається при встановленні коефіцієнту Γ режиму роботи інерційного віброконвеєра, що дорівнює значенню 5. При подальшому підвищенні значення цього коефіцієнта суттєво знижується продуктивність вібротранспортера.

В роботі [16] представлено наукові результати чисельного моделювання з використанням платформи STAR-CCM + руху насіння соняшнику по вібруючій поверхні, яка обдувається стисненим повітрям. А проведені експериментальні

дослідження дозволили визначити оптимальні значення параметрів, що впливають на продуктивність машини та затрати потужності на привод. Так доведено, що для отримання максимальної продуктивності вібраційної машини 1029 кг/год, потрібно дотриматися таких значень параметрів машини: кути нахилу віброуючої поверхні $\alpha = 3,8^\circ$, $\beta = 4,0^\circ$; робоча частота вібрації $\psi = 5$ Гц; швидкість руху повітря $v = 4$ м/с.

Постановка завдання. Метою досліджень є аналіз конструктивних особливостей та принципів дії віброживильників, що використовуються для транспортування та дозування насіння, з метою визначення оптимальних технічних рішень для забезпечення рівномірної та керованої подачі насіннєвого матеріалу в системах автоматичного фенотипування, орієнтованих на застосування технологій машинного зору.

Аналіз конструктивних особливостей та принципів дії віброживильників. Транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур засобами вібраційної техніки має свої особливості та тонкощі. Кожний вид насіння характеризується різноманітністю геометричних, механіко-технологічних та реологічних параметрів. Це носить суттєвий вплив на продуктивність та точність дозування вібротранспортерів. Адже під кожний вид насіння потрібно оптимізувати конструктивно-технологічні показники вібраційних живильників. Тому ціллю даного дослідження є аналіз та систематизація досягнень та шляхів покращення якості роботи вібромашин для транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур.

В різних галузях промисловості застосовується велике число вібромашин, які відрізняються конструктивним виконанням і технологічними функціями. Професорами А.А. Співаковським і І.Ф. Гончаревичем [5] запропонована класифікація вібромашин (рис. 2) по їх виробничому призначенню. В промисловості найбільш широко поширені наступні вібромашини: конвеєри, грохоти, живильники, живильники-грохоти, бункери-дозатори, спонукачі і ін. Віброживильники випускають і доставляють сипкі вантажі з бункерів, кузовів та інших акумулюючих ємностей при невеликій довжині транспортування. По конструктивних ознаках віброконвеєри та віброживильники розділяються відповідно до режиму роботи на резонансні і зарезонансні; по числу мас, що коливаються – на одномасні і багатомасні; по типу приводу – на машини з ексцентриковим, інерційним, електромагнітним, електромеханічним, пневматичним приводом; по напрямку транспортування – на горизонтальні, похилі спадні, похилі підіймаючі, вертикальні, по криволінійній траєкторії; за типом пружної підвіски – з підвіскою у вигляді пакету плоских металевих або полімерних пружин, з підвіскою у вигляді круглих стержнів, з підвіскою у вигляді ґратчастих гіперболоїдних торсіонів, з підвіскою гумовими віброізоляторами; за способом зміни резонансних налаштувань вібрації робочих органів – зміною кількості пружних елементів, зміною жорсткісних характеристик підвіски, зміною робочої маси віброживильника, зміною робочої частоти коливань; за формою робочих органів – лоткового типу, чашоподібного типу (циліндрична та конічна).

Є чотири основні способи переміщення сипких вантажів вібраційними конвеєрами (рис. 3): ковзання (рис. 3, а) (частинки сипкого вантажу знаходяться у постійному контакті з поверхнею жолоба), підкидування (рис. 3, б) (переміщення частинок відбувається за допомогою мікрокидків, створюваних вібруванням жолоба), храпове транспортування (рис. 3, с) (переміщення частинок матеріалу відбувається за рахунок лише вертикальної вібрації жолоба, що має спеціальний профіль поверхні), поверхневе переміщення частинок сипкого вантажу по ворсовій поверхні (рис. 3d) (напрямок та швидкість руху частинок вантажу регулюється напрямом та кутом нахилу ворсинок на жолобі вібротранспортера. При цьому жолоб вібрує тільки в вертикальній площині).

Важливими параметрами, при оптимізації транспортування сипких вантажів вібраційними конвеєрами, являються: гранулометричний склад та форма частинок сипкого вантажу (при експериментах відмічено, що частинки сипкого вантажу більших

розмірів під вібраційним впливом виштовхуються на поверхню транспортуемого шару вантажу. Цей феномен названо «ефектом бразильського горіха» [18]). Також важливим є тертя між частинками вантажу та частинок з стінками робочого органу конвеєра, модуль пружності частинок вантажу або транспортуемого шару сипкого вантажу, когезія, товщина шару транспортуемого сипкого вантажу та його проникність повітрям. На рис. 4 представлено основні конструктивні параметри вертикальних спіральних віброживильників.



Рисунок 2 – Класифікація вібромашин для випуску, доставки, навантаження і транспортування сипких та штучних вантажів

Джерело: розроблено авторами

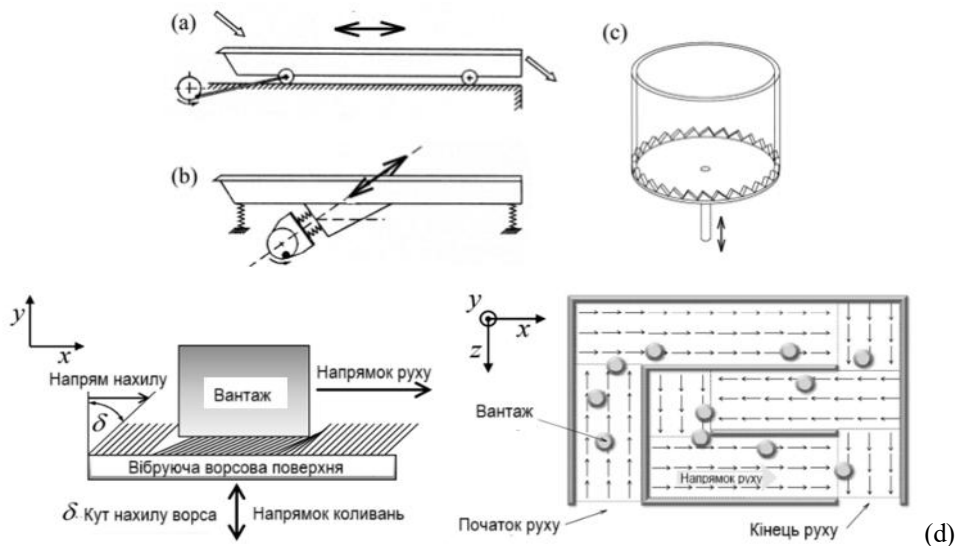


Рисунок 3 – Схеми способів переміщення вантажів у віброконвеєрах: а – ковзання; б – підкидування; с – храпове транспортування; д – поверхневе переміщення частинок сипкого вантажу по ворсовій поверхні

Джерело: розроблено на підставі [17]



Рисунок 4 – Схема будови та конструктивних параметрів робочого органу вібраційного бункерного живильника

Джерело: розроблено на підставі [18]

Основними перевагами вертикальних спіральних чашових віброконвеєрів в порівнянні з горизонтальними віброконвеєрами являються:

- невелика займаєма площа в виробничих приміщеннях;
- завдяки більшому часу транспортування вантажів, паралельно з процесом транспортування можуть виконуватись процеси сушіння, охолодження, а також орієнтування вантажів для наступного технологічного процесу;
- забезпечує плавне транспортування вантажів, які важко транспортувати іншими видами конвеєрів. Наприклад, вантажі, що мають складну форму а також вантажі сферичної форми;
- забезпечує постійну швидкість транспортування вантажів, що позитивно впливає на якість послідовних технологічних процесів обробки вантажу-сировини;
- може легко змінювати свою продуктивність за рахунок зміни параметрів віброприводу (маса дебалансів, частота обертання ротора, частота вхідного електричного струму та ін.);
- може використовуватись у якості віброживильників для рівномірної подачі штучних вантажів для їх подальшої обробки на технологічних машинах;
- при транспортуванні утворення пилу з частинок вантажу мінімальне;
- простота конструкції забезпечує низьку трудомісткість робіт при технічному сервісі механізмів конвеєра.

На рис. 5 та 6 представлено конструктивну схему та загальну будову вібраційного конвеєра та спірального живильника.

Використання вібраційних машин в промисловості має давню історію. Методика синтезу вібротранспортуючих машин викладена в Директиві VDI 2333 Schwingförderer für Schüttgut [17]. Цей документ на сьогодні є основою в країнах Європейського Союзу для промислового конструювання вібраційних конвеєрів призначених для транспортування сипких вантажів.

Тривала практика використання методики Директиви VDI 2333 показала, що найбільшої точності мають розраховані параметри швидкості руху сипкого вантажу при значенні коефіцієнту часу вільного польоту n частинки вантажу в межах $0,7 < n < 0,9$ та значеннях кута нахилу вектора збурюючої сили віброприводу до поверхні жолоба $20^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$.

Основною характеристикою роботи будь-якої транспортуючої машини являється її продуктивність, а отже, швидкість переміщення часток вантажу по поверхні робочого органу. Звичайно, що ця швидкість повинна бути оптимальною в економічному плані,

робота машини на таких швидкостях не повинна знижувати показники технічної надійності і, основне, не травмувати й не пошкоджувати вантаж при транспортуванні. Факторів, що впливають на продуктивність віброконвеєрів є досить багато. Серед основних є тип вібропривода, використання пружних та демпфуючих елементів в конструкції вібраційної машини. Найбільш простими у будові є двомасні віброконвеєри. Але при їх роботі отримуються порівняно невеликі значення швидкостей руху вантажу по робочому органу. Такі бункерні вібраційні живильники використовують у якості привода електромагніти з робочими частотами струму 50-100 Гц та характеризуються пружною підвіскою (поз.3, рис.5) робочого органа у вигляді пруткових або плоских пружинних елементів, що нахилені під певним кутом до горизонту. В цьому конструктивному рішенні реалізуються коливання чаші за способом направленої підвіски і найоптимальнішим режимом транспортування сипких вантажів є білярезонансне налаштування віброживильника.

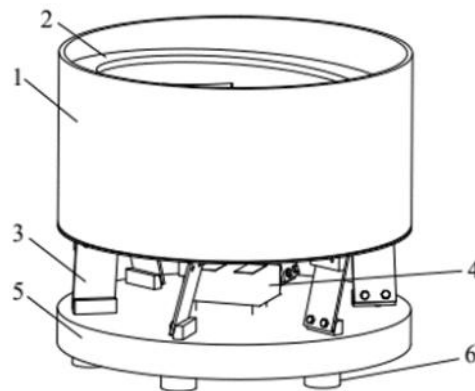


Рисунок 5 – Будова спірального вібраційного бункерного живильника: 1 – вібраційний бункер;
2 – жолоби по яким рухаються частинки вантажу; 3 – пружна підвіска бункера; 4 – електромагніт;
5 – реактивна маса; 6 – віброізолятори

Джерело: розроблено на підставі [18]

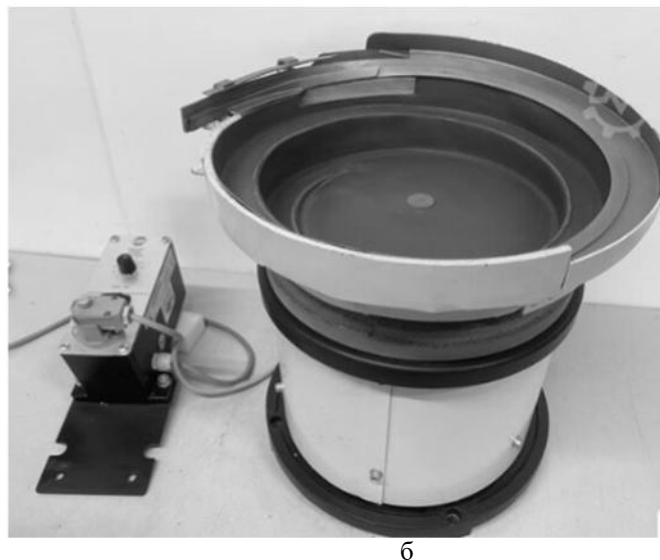
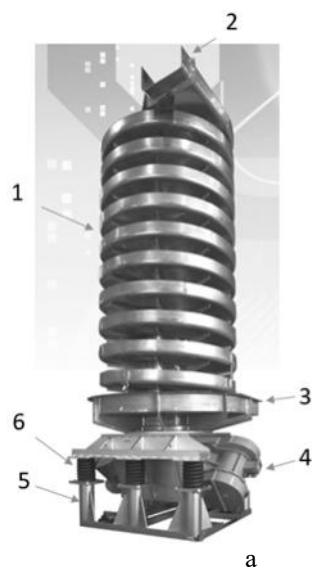


Рисунок 6 – Загальний вигляд вертикальних спіральних вібраційних машин: а – вібраційний конвеєр:
1 – вібраційний лоток; 2 – місце випуску транспортованої сировини; 3 – накопичувальний лоток сипких вантажів; 4 – вібропривод електричний; 5 – опорна рама; 6 – пружні елементи, б – спіральний вібраційний живильник

Джерело: розроблено на підставі [21]

Хоча така пружна підвіска й характеризується простотою будови та високою експлуатаційною надійністю, але має ряд недоліків таких як немонолітність конструкції, складність організації системи кріплення пружних елементів, необхідність технічної перевірки справності підвіски тощо. Цікавим конструктивним рішенням, яке дає змогу покращити характеристики пружної системи вібраційного бункерного спірального живильника є використання пружного елемента у вигляді торсіону гіперболоїдного виду (рис.7). Завдяки монолітності конструкції та відсутності різьбових з'єднань, такі пружні елементи легко монтувати та забезпечувати стабільність параметрів вібрації. Основним недоліком торсіонів гіперболоїдного виду є затрати на їх виготовлення та складність конструкції.

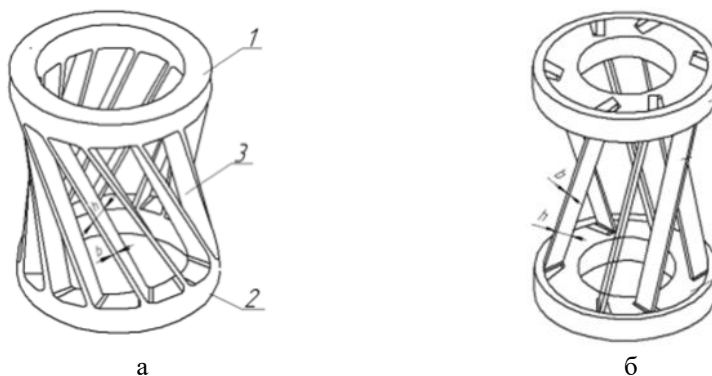


Рисунок 7 – Торсіони гіперболоїдного виду: а – монолітної; б – набірної конструкції; 1 – верхній фланець; 2 – нижній фланець; 3 – пружний елемент; h – ширина плоского пружного елемента; b – товщина пружного елемента

Джерело: розроблено на підставі [19]

На рис. 8 наведено типову конструкцію бункерного спірального вібраційного живильника з пружним органом у вигляді торсіону гіперболоїдного виду.

Робочий орган має спіральні жолоби 1 (рис. 8), по яким під дією коливань переміщуються частинки сипкого вантажу. Гіперболоїдний торсіон 2 верхнім фланцем жорстко кріпиться з бункером, нижнім фланцем кріпиться з реактивною масою 3. До рами 5 торсіон 2 з'єднується через втулки 4. Корпус електромагніта 8 кріпиться до реактивної маси 3 і через якір 6 та трубу 7 передає гармонійну збудовальну силу до верхнього фланця торсіону. Існують конструкції, що мають в складі пружної підвіски як гумові деталі так і сталеві. Приклад такого віброживильника наведено на рис 9.

Пошук оптимальних параметрів вібрації в таких конструкціях дають змогу забезпечити гумові віброізолятори 7,8 з різними жорсткісними характеристиками.

Важливим при роботі вібраційних бункерних живильників є збереження їх продуктивності при зміні їх експлуатаційних параметрів. Наприклад ваги вантажу, що перебуває у бункері. Адже при його зменшенні зменшується вага робочого навантаження, а отже, і вібраційний режим конвеєра. Конструкція бункерного віброживильника представлена на рис.10 має таку ознаку, як рухоме конусне дно бункера 8. Це дає змогу зменшити вплив на продуктивність віброконвеєра зміни маси вантажу при транспортуванні, знизити затрати на електроенергію та знизити рівень робочого шуму.

Вібраційні спіральні бункерні віброживильники, що мають електромагнітний вібропривод та пружну підвіску з направленими коливаннями найбільше використовуються при транспортуванні та позиціюванні вантажу для подальшої технологічної дії у системах з невеликими потужностями. Недоліком таких конструкцій є необхідність використання реактивних мас, що призводить до збільшення затрат на виготовлення віброживильників, а також до збільшення загальної маси вібромашини.

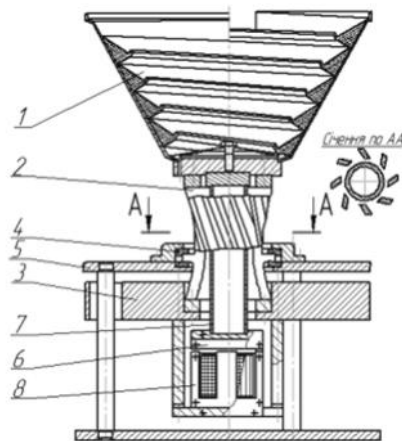


Рисунок 8 – Вібровживильник з гіперboloїдним торсіонним пружним елементом та конусною чашею:

1 – конусний бункер з спіральними жолобами; 2 – верхній фланець гіперboloїдного торсіону;
3 – реактивна маса; 4 – втулки; 5 – рама; 6 – якор електромагнітного вібропривода; 7 – передавальна труба; 8 – корпус електромагнітного вібропривода

Джерело: розроблено на підставі [19]

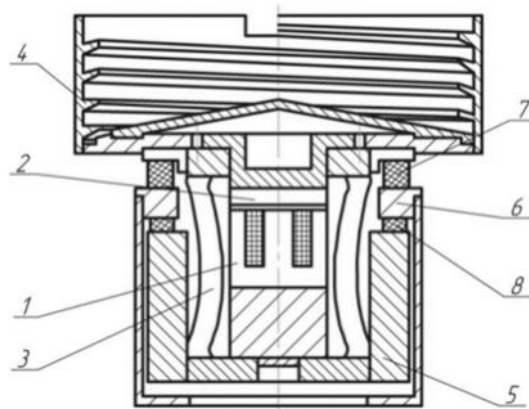


Рисунок 9 – Вібровживильник з гумово-металевою пружною підвіскою:

1 – електромагніт; 2 – якор електромагніта; 3 – сталевий торсіон гіперboloїдного виду; 4 – бункер з спіральними жолобами; 5 – реактивна маса; 6 – корпус; 7, 8 – гумові пружні елементи

Джерело: розроблено на підставі [19]

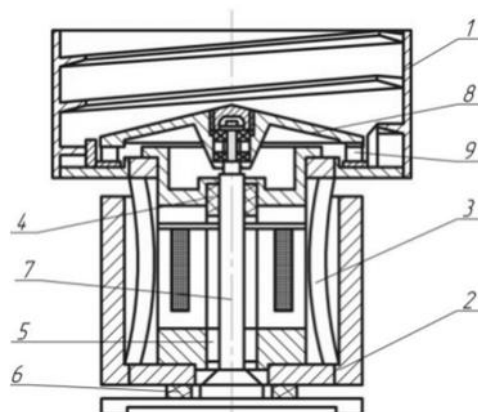


Рисунок 10 – Вібраційний бункерний живильник з обертовим днищем: 1 – бункер; 2 – реактивна маса;

3 – сталевий торсіон гіперboloїдного виду; 4, 5, 6 – гумові пружні елементи; 7 – нерухома стійка; 8 – обертове дно бункера; 9 – механізм передавання обертання

Джерело: розроблено на підставі [19]

Перспективними є двомасні і багатомасні віброконвеєри, що завдяки своїй конструкції можуть створювати еліптичні траєкторії руху при коливаннях робочого органу. Такі коливання сприяють збільшенню значень робочих швидкостей руху часток вантажу по робочому вібруючому органі. Створюючи еліптичні коливання, ускладнюється конструкція вібромашин, підвісок робочих органів та будови віброприводів. Тому, основною задачею конструкторів є отримання якісної, продуктивної та надійної вібромашини. Складною задачею є створення еліптичних траєкторій руху робочих органів вертикальних спіральних віброконвеєрів. Для цього необхідно змінювати не тільки будову і віброприводів і пружних підвісок, а також прискіпливо визначати параметри пружності і в'язкості елементів віброконвеєра.

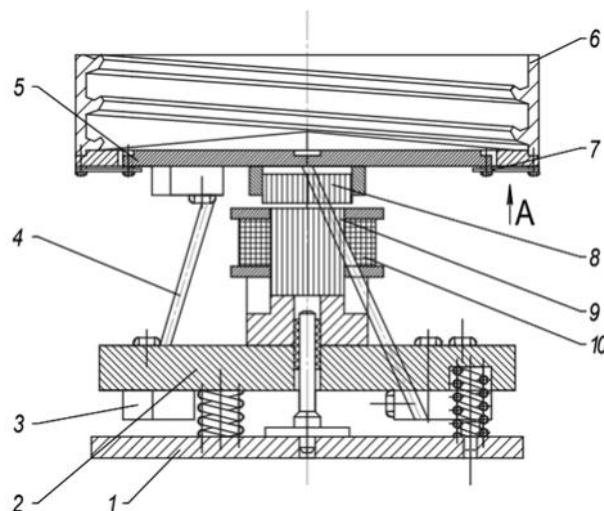


Рисунок 11 – Будова вертикального вібраційного живильника з еліптичною траєкторією руху робочого органу: 1 – віброізоляційна основа; 2 – плита кріплення електромагнітного віброприводу; 3 – кронштейни кріплення плоских пружин; 4 – плоскі пружини; 5 – днище бункера; 6 – корпус живильника з внутрішнім спіральним жолобом; 7 – пружний елемент; 8 – яркір; 9 – осердя магніту; 10 – обмотка електромагніту

Джерело: розроблено на підставі [19]

Провівши аналіз сучасних досягнень в сфері розвитку машин для вібротранспортування, встановлено, що є декілька основних технічних способів, що сприяють утворенню еліптичних траєкторій руху робочого органу вертикальних віброживильників. Першим способом є розрив жорсткого зв'язку робочого органу віброконвеєра з віброприводом та введення демпфуючих та пружних елементів між ними. Це дає змогу змінювати амплітуди вертикальних та горизонтальних коливань робочого органу, утворювати зсув фаз коливань і, як наслідок, створення руху точок робочого органу по еліптичній траєкторії. На рис. 11 представлена конструктивна схема віброживильника з еліптичною траєкторією руху чаші.

Робочий процес пристрою відбувається так. При подачі струму на обмотку 10 електромагніту, яркір 8, що прикріплений до платформи 5, отримує вертикальні та горизонтальні коливання. Коливання ярка 8 через три похилі плоскі пружини 4 перетворюються в коливання платформи 5 в вертикальному і горизонтальному напрямках. Таким чином, платформа 5 отримує зворотно-поступальний рух від центрального електромагнітного вібратора, встановленого в центрі вібраційного живильника і здійснює вимушені лінійні коливання, що перпендикулярні осі похилої пружини, а бункер 6 коливання у вертикальній площині зі зміщенням фази щодо коливань платформи 5. Лінійні коливання платформи 5 мають горизонтальну та

вертикальну складові. Їхнє співвідношення залежить від кута нахилу осі пружин 4, при цьому бункер 6 здійснює такі ж горизонтальні коливання як і платформа 5, так як пружні елементи 7 мають жорсткість в горизонтальній площині, яка набагато більша ніж у вертикальній площині. При цьому вертикальні коливання бункеру 6 будуть мати величину відмінну від величини коливань платформи 5. Таким чином забезпечуються коливання бункеру 6 по еліптичній траєкторії в результаті складення гармонічних коливань в двох взаємоперпендикулярних площинах при фазовому зміщенні.

Другим способом отримання еліптичної траєкторії руху матеріальної точки робочого органу вертикального віброконвеєра є спеціальне розміщення віброприводів. Такий спосіб захищений патентом на винахід Чеської республіки [14]. На рис. 12 схематично представлено способи розміщення віброприводів у вертикальних віброживильників, що дають змогу отримувати еліптичні траєкторії руху матеріальних точок робочого органу машини. Встановлення дебалансних віброприводів під деяким кутом A до вертикальної осі віброконвеєра (рис. 12, а), а також зміщення осей віброприводів по горизонталі на величину B (рис. 12, б) є конструктивно простими та малозатратними способами створення еліптичних траєкторій руху робочого органу. Основною перевагою таких способів є також можливість встановлення сервоприводів, які б змінюючи параметри встановленні віброприводів (кут нахилу та зміщення), створювали еліптичну траєкторію руху змінної характеристики. Це дає змогу проводити налаштування продуктивності віброконвеєра при транспортуванні сипких вантажів аграрного виробництва. Наприклад, насіння різних культур, насіння з різною вологістю та іншими реологічними параметрами.

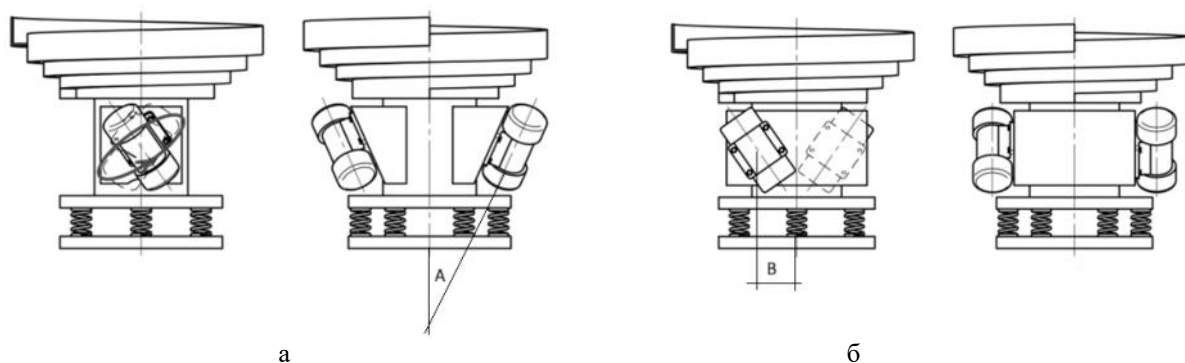


Рисунок 12 – Варіанти розміщення віброприводів в вертикальному вібраційному конвеєрі для отримання еліптичних траєкторій руху робочого органу: а – осі дебалансних віброприводів нахилені під кутом A до вертикалі; б – дебалансні віброприводи зміщені на величину B від центральної вертикальної осі віброконвеєра

Джерело: розроблено на підставі [14]

Аналіз приводів віброконвеєрів

Електромагнітні приводи (рис.13) дозволяють регулювати параметри вібрації безступенево. Дають миттєве максимальне значення потужності при ввімкненні та швидкий час зупинки робочого органу конвеєра при вимкненні. Таким чином транспортуємий матеріал швидко припиняє рух. Це дозволяє використовувати їх в вібраційних дозаторах. Приводи таких типів мають високу довговічність, магнітний вібратор захищений від перегріву. Завдяки простоті конструкції швидко вводяться в дію та налаштовуються на параметри системи. Недоліком таких приводів є суттєва залежність амплітуди та частоти вібрацій від напруги електричної мережі. Як наслідок зменшення продуктивності віброконвеєра при коливаннях напруги електричного струму. Також постійність частоти та малі амплітуди (0,5–2,0 мм) обмежують

можливість використання електромагнітних віброзбуджувачів для транспортування пилевидних насипних вантажів.



Рисунок 13 – Загальний вигляд електромагнітних віброприводів віброживильників
Джерело: розроблено на підставі [22]

Дебалансні відцентрові віброзбуджувачі (рис. 14) використовуються в якості генерування вібрації в таких машинах як віброконвеєри, віброживильники, вібросита та ін. Можуть створювати направлені коливання з максимальним зусиллям поштовху до 119 кН та переміщувати вагу вантажу до 5000 кг. Такі віброприводи відомі своєю високою надійністю, продуктивністю, економічністю у використанні. Безшумність при роботі (до 76 дБ) та повна герметичність забезпечує санітарні та протипожежні вимоги промислових приміщень.



Рисунок 14– Дебалансні відцентрові віброзбуджувачі
Джерело: розроблено на підставі [22]

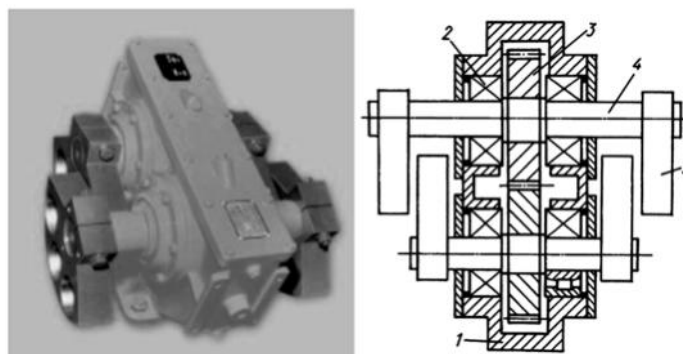


Рисунок 15 – Відцентровий привід направленої дії: 1 – корпус; 2 – підшипники; 3 – зубчасті колеса; 4 – вали; 5 – дебаланси
Джерело: розроблено на підставі [22]

Відцентровий привід направленої дії (рис. 15) використовуються для вібромашин високої продуктивності та транспортування вантажів з великим значенням насипної щільності при одночасному завантаженні більше 4000 кг. Можуть створювати коливання з зусиллям до 424 кН. Приводяться в дію від електричних асинхронних двигунів через карданний вал, пружну муфту або пасову передачу. Мають тривалий технічний ресурс, строк використання, безшумність при роботі та широкий діапазон регулювання параметрів вібрації.

Оригінальну конструкцію привода вібраційного транспортера описано в науковій роботі [15]. На рис. 16 представлено фото дослідного вібропривода конвеєра. Змінюючи положення дебалансів отримують різні траєкторії руху робочого органу віброживильника.

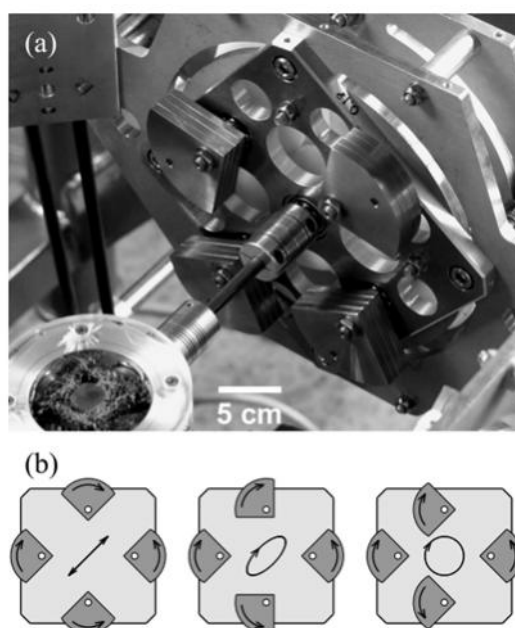


Рисунок 16 – Вібропривода з дебалансами: а – загальний вигляд;
б – положення встановлення дебалансів на валах для отримання лінійної
(кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = 0$),
еліпсної (кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = \pi/4$)
та колової (кут зсуву фаз горизонтальних та вертикальних коливань $\varphi = \pi/2$)
траєкторій руху робочого органу віброконвеєра

Джерело: розроблено на підставі [15]

Висновки. Одним з найбільш ефективних сучасних способів очищення, сепарації та сортування насіння сільськогосподарських культур є спосіб фенотипування. Системи фенотипування використовують у своїй будові велику кількість механічних та мехатронних елементів, які дозволяють працювати їм у автоматичному режимі. Запорукою високоефективної роботи систем автоматичного фенотипування насіння є організація рівномірної, регульованої подачі насіннєвого матеріалу на стрічковий конвеєр з метою сканування його параметрів (кольору, розміру, форми) автоматичними цифровими датчиками-відеокамерами. Серед великого різноманіття конструкцій дозаторів, живильників, висівних пристроїв та ін, як засобів видачі насіння з акумулюючих ємностей (бункерів), особливої уваги заслуговують вібраційні бункерні спіральні живильники. Характеризуючись великою кількістю переваг в конструкції та техніко-економічних показниках та маючи тривале практичне

застосування, спіральні віброживильники розглядаються як основні пристрої дозування насіння в сучасних автоматичних лініях фенотипування.

Проведено аналіз наукових досліджень процесів транспортування та дозування сипких вантажів з використанням вібраційних живильників. Встановлено, що вібраційні спіральні живильники мають ряд переваг перед лотковими віброконвеєрами. Аналіз конструкцій вібраційних живильників для транспортування насіння, надав змогу виділити основні тенденції в їх розвитку конструктивно-технологічних параметрів. Огляд показав, що пружними елементами віброживильників для дозування сипких та мілко-штучних вантажів є полімерні або металеві ресори у вигляді нахилених під кутом до горизонту стержнів або пластин. Широкого розповсюдження має пружня підвіска бункера живильника у вигляді гіперболоїдного торсіону. Актуальним напрямом розвитку конструкцій вібраційних спіральних живильників є забезпечення коливання робочого органу по еліптичній траєкторії. Досягти це можливо такими способами: створення спеціальної конструкції пружних елементів віброживильника, раціональне розміщення віброприводів відносно робочого органу, використання віброприводів, що можуть змінювати траєкторію руху робочого органу на лінійну, колову та еліптичну. Зважаючи на результати наукового огляду, можна стверджувати, що найоптимальнішим видом віброприводу в спіральних вібраційних живильниках, які можуть використовуватись в системах автоматичного фенотипування насіння, є дебалансні відцентрові віброзбудувачі.

Матеріал надав змогу систематизувати досягнення у розвитку конструкцій та шляхів підвищення ефективності використання вібраційних живильників для транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур в автоматичних системах фенотипування.

Список літератури

1. Pieruschka R., Schurr U. Plant Phenotyping: Past, Present, and Future. *Plant Phenomics*. 2019. Vol. 2019. P. 1–6. DOI: 10.34133/2019/7507131
2. Алієв Е. Б. Автоматичне фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику : монографія. Київ : Аграрна наука, 2022. 104 с.
3. Алієв Е. Б., Ведмедева К. В. Кількісне фенотипування генотипів соняшнику : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 204 с.
4. Ланець О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Кн. 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органу : навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. 612 с.
5. *Підйомно-транспортні машини* : підруч. / Кобець А. С. та ін. ; за ред. А. С. Кобця, В. І. Дирди. Луганськ : ДЗ «ЛНУ ім. Т. Шевченка», 2013. 218 с.
6. Chen H., Li L., Zhang W., Liu R., Jiang S. A Vibratory Conveying Method for Planetary Regolith: Preliminary Experiment and Numerical Simulation. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 29386–29396. DOI: 10.1109/access.2019.2902348
7. Hamed Y. S., Alotaibi H., El-Zahar E. R. Nonlinear Vibrations Analysis and Dynamic Responses of a Vertical Conveyor System Controlled by a Proportional Derivative Controller. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 119082–119093. DOI: 10.1109/access.2020.3005377
8. Chen H., Jiang S., Liu R., Zhang W. Particle Directional Conveyance under Longitudinal Vibration by Considering the Trough Surface Texture: Numerical Simulation Based on the Discrete Element Method. *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018. P. 1–13. DOI: 10.1155/2018/8260462
9. Ніколайчук І. І., Ратушняк Г. С., Коц І. В. Математичне моделювання і оптимальне управління робочим процесом сушильної камери. *Вісник ВПІ*. 2005. № 6. С. 196–199.
10. Keppler S., Bakalis S., Leadley C. E., Fryer P. J. Processing of Barley Grains in a Continuous Vibrating Conveyor. *Journal of Food Engineering*. 2016. Vol. 187. P. 114–123. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010.

11. Keppler S., Bakalis S., Leadley C. E., Fryer P. J. A Systematic Study of the Residence Time of Flour in a Vibrating Apparatus Used for Thermal Processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 33. P. 462–471. DOI: 10.1016/j.ifset.2015.12.003
12. Bespalov A., Svidrak I., Boiko O. Study of the Dynamic Model of the Oscillating System of Vibratory Feeders with an Elliptical Trajectory of the Movement of the Working Body. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*. 2022. Vol. 24 (98). P. 76–81. DOI: 10.32718/nvlvet-f9814
13. Calta J. Vibratory Conveyor with Elliptical Oscillation is Quiet and Fast. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. 2024. Vol. 8. P. 1–12. DOI: 10.13140/RG.2.2.10392.37128
14. Vibratory Conveyor with Elliptical Oscillation. *ROBOTERM* : веб-сайт. URL: <https://www.roboterm.cz/en/induction/elliptical-oscillation> (дата звернення: 25.04.2025).
15. Krülle C. A., Götzendorfer A., Grochowski R., Rehberg I., Rouijaa M., Walzel P. Granular Flow and Pattern Formation on a Vibratory Conveyor. *Traffic and Granular Flow'05*. 2007. P. 111–128. DOI: 10.1007/978-3-540-47641-2_9
16. Alliev E., Gavrilenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the Sunflower Seed Separation Process Efficiency on the Vibrating Surface. *Acta Periodica Technologica*. 2019. Vol. 50. P. 12–22. DOI: 10.2298/apt1950012a
17. VDI 2333:2017-10. *Schwingförderer für Schüttgut (Vibration Conveyors for Bulk Material)*. [Чинний від 2017-10]. Berlin, 2017. 32 с. (Технічні вимоги Німеччини).
18. Dallinger N. Die Diskrete Elemente Methode als Simulationsmethode in der Vibrationsfördertechnik : дис. ... доктора-інженера. Технічний університет м. Хемніц. Хемніц, 2017. 158 с.
19. Печонка В. С. Розроблення і проєктування вібраційного бункерного живильника : кваліфікац. роб. ... бакалавра. Дубляни : Львів. нац. ун-т природокористування, 2023. 45 с.
20. Zhao Y. J., Huang F. S., Zhao Z. L. Dynamic Analysis on Vertical Vibratory Conveyor. *Advanced Materials Research*. 2013. Vols. 694–697. P. 3–6. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.3
21. *Vibrating Conveyors. Каталог конструкцій*. Sinfoniya Technology Co., Ltd, 2015. 22 с.
22. *Vibrating Conveyors. Каталог конструкцій*. AVITEQ Vibrationstechnik GmbH, 2023. 20 с.

References

1. Pieruschka, R., & Schurr, U. (2019). Plant phenotyping: Past, present, and future. *Plant Phenomics*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.34133/2019/7507131>
2. Alliev, E. B. (2022). *Automatic phenotyping of sunflower seed material: Monograph*. Kyiv: Agrarian Science [in Ukrainian].
3. Alliev, E. B., & Vedmedieva, K. V. (2024). *Quantitative phenotyping of sunflower genotypes: Monograph*. Dnipro: LIRA [in Ukrainian].
4. Lanets, O. S. (2018). *Fundamentals of calculation and design of vibration machines. Book 1. Theory and practice of creating vibration machines with harmonic motion of the working body: Textbook*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
5. Kobets, A. S., et al. (2013). *Lifting and transport machines: Textbook*. A. S. Kobets & V. I. Dyrda (Eds.). Luhansk: LNU named after T. Shevchenko [in Ukrainian].
6. Chen, H., Li, L., Zhang, W., Liu, R., & Jiang, S. (2019). A vibratory conveying method for planetary regolith: Preliminary experiment and numerical simulation. *IEEE Access*, 7, 29386–29396. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2902348>
7. Hamed, Y. S., Alotaibi, H., & El-Zahar, E. R. (2020). Nonlinear vibrations analysis and dynamic responses of a vertical conveyor system controlled by a proportional derivative controller. *IEEE Access*, 8, 119082–119093. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3005377>
8. Chen, H., Jiang, S., Liu, R., & Zhang, W. (2018). Particle directional conveyance under longitudinal vibration by considering the trough surface texture: Numerical simulation based on the discrete element method. *Shock and Vibration*, 2018, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/8260462>
9. Nikolaichuk, I. I., Ratuszniak, H. S., & Kots, I. V. (2005). *Mathematical modeling and optimal control of the working process of a drying chamber*. *Visnyk VPI*, (6), 196–199 [in Ukrainian].
10. Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). Processing of barley grains in a continuous vibrating conveyor. *Journal of Food Engineering*, 187, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.010>
11. Keppler, S., Bakalis, S., Leadley, C. E., & Fryer, P. J. (2016). A systematic study of the residence time of flour in a vibrating apparatus used for thermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.003>

12. Bespalov, A., Svidrak, I., & Boiko, O. (2022). Study of the dynamic model of the oscillating system of vibratory feeders with an elliptical trajectory of the movement of the working body. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 24(98), 76–81. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9814>
13. Calta, J. (2024). Vibratory conveyor with elliptical oscillation is quiet and fast. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10392.37128>
14. *Vibratory conveyor with elliptical oscillation*. ROBOTERM: Website. Retrieved April 25, 2025, from <https://www.roboterm.cz/en/induction/elliptical-oscillation>
15. Krülle, C. A., Götzendorfer, A., Grochowski, R., Rehberg, I., Rouijaa, M., & Walzel, P. (2007). Granular flow and pattern formation on a vibratory conveyor. In *Traffic and Granular Flow'05* (pp. 111–128). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47641-2_9
16. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 50, 12–22. <https://doi.org/10.2298/apt1950012a>
17. VDI 2333:2017-10. (2017). *Vibration conveyors for bulk material*. Berlin: VDI [Technical requirements, Germany].
18. Dallinger, N. (2017). *Die Diskrete Elemente Methode als Simulationmethode in der Vibrationsfördertechnik* (Doctoral dissertation). Technical University of Chemnitz, Chemnitz.
19. Pechonka, V. S. (2023). *Development and design of a vibratory bunker feeder: Bachelor's qualification work*. Dublyany: Lviv National University of Nature Management [in Ukrainian].
20. Zhao, Y. J., Huang, F. S., & Zhao, Z. L. (2013). Dynamic analysis on vertical vibratory conveyor. *Advanced Materials Research*, 694–697, 3–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.3>
21. Sinfoniya Technology Co., Ltd. (2015). *Vibrating conveyors: Design catalog*. 22 p.
22. AVITEQ Vibrationstechnik GmbH. (2023). *Vibrating conveyors: Design catalog*. 20 p.

Elchyn Aliiev, Sr. Researcher, DSc, **Olexandr Chernii**

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Analysis of Vibrating Feeders for Transporting and Dosing Seeds in the System of Their Automatic Phenotyping

The paper presents the actualization of the use of vibrating feeders in modern technological lines for processing and preparing seeds of agricultural crops. The results of scientific research into the process of transporting and dosing particles of loose cargo along the working body of the vibrating feeder are presented.

The dependence of the qualitative characteristics of the operation of vibrating feeders on the influence of such parameters as the granulometric composition of cargo particles, the height of the transported cargo layer, the inclination of the working trough of the feeder bowl to the horizon, the angle of inclination of the disturbing force vector, the trajectory of movement of the working body of the vibrating feeder, etc. is described. An analysis of existing designs of bunker spiral vibrating feeders is presented.

Analysis of the designs of vibrating feeders has shown that an electromagnetic vibratory drive is most often used as a vibratory drive of feeders. The elastic elements of vibrating feeders are polymer or metal springs in the form of rods or plates inclined at an angle to the horizon. The elastic suspension of the feeder hopper in the form of a hyperboloid torsion is also widespread.

The current direction of development of designs of vibrating spiral feeders is to ensure oscillation of the working body along an elliptical trajectory. This can be achieved by the following methods: creating a special design of the elastic elements of the vibrating feeder, placing the vibration drives relative to the working body, using vibration drives that can change the trajectory of movement of the working body from linear to elliptical.

The material made it possible to systematize achievements in the development of designs and ways to increase the efficiency of using vibrating feeders for transporting and dosing seeds of agricultural crops.

seed phenotyping, vibrating feeder, seed mixture, vibration parameters, working body of the vibrating feeder, elastic element of the vibrating feeder, vibration drive, trajectory of movement of the working body

Одержано (Received) 10.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025