

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОНАННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ
ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

ТРОХАНЯК Олександра Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України

ТРОХАНЯК Віктор Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України

РЕФЕРАТ

Київ – 2021

Актуальність роботи. На підприємствах сільськогосподарського виробництва для очищення зернового матеріалу широко використовуються зерноочисні машини, які виконують попереднє та основне очищення. До недоліків їх роботи слід віднести виділення зернового пилу та легких домішок у робочий простір навколо машини, що ускладнює її експлуатацію і погіршує ергономічні показники. Тому пошук нових технічних рішень з утилізації зернового пилу та легких домішок на пересувних плоскорешітних машинах є актуальною задачею.

Шнекові гвинтові конвеєри, як окремий технічний елемент транспортних механізмів, знайшли широке використання в компоновальних схемах машин для перенавантаження або переміщення сипких матеріалів у зв'язку з їх простотою конструкції, технічного обслуговування та можливістю завантаження й розвантаження матеріалу в будь-якому місці технологічної лінії.

При транспортуванні гвинтовими конвеєрами зернових матеріалів сільськогосподарського виробництва однією з проблем є значний ступінь їх пошкодження, а також підвищені енерговитрати та обмежені функціональні можливості, які пов'язані виключно з процесом переміщення матеріалу. До основних причин пошкодження зернових матеріалів відносять попадання їх частинок у технологічний зазор між жорстким обертовим шнеком і нерухомою внутрішньою поверхнею направляючої труби, внаслідок чого відбувається повне або часткове пошкодження окремих частинок матеріалу. Також можливе заклинювання робочого органу при транспортуванні твердих кускових матеріалів, що призводить до поломок елементів гвинтових конвеєрів.

Таким чином, серед актуальних завдань сільськогосподарського виробництва важливим є розробка та обґрунтування раціональних параметрів малогабаритних шнекових пневмотранспортерів, які б забезпечували ефективне переміщення зернових матеріалів по технологічних трасах різної просторової конфігурації. А також актуальним є завдання розробки нових конструкцій запобіжних муфт гвинтових конвеєрів для осьового відведення робочого органу при виникненні перевантаження та забезпечення відновлення його початкового положення.

Метою роботи є підвищення ефективності виконання процесів очищення та транспортування зернових матеріалів шляхом вдосконалення пневмовідцентрової

частини пневмовібровідцентрового сепаратора зерна, розробки конструкції та вибору оптимальних параметрів шнекового пневмотранспортера, а також підвищення ефективності функціонування гвинтових конвеєрів в екстремальних умовах експлуатації шляхом розроблення та обґрунтування раціональних параметрів запобіжної муфти шнекового робочого органу.

Для її досягнення було вирішено *завдання*:

- проведено аналіз результатів наукових досліджень процесів безрешітного очищення та фракціонування зернових матеріалів
- проведено аналіз відомих способів та конструкцій шнекових транспортерів для переміщення сипких матеріалів і відомих конструкцій запобіжних муфт та результатів їх теоретичних і експериментальних досліджень;
- розроблено математичну модель руху частинки по кромці похилої площини, яка обертається навколо осі обмежуючого циліндра;
- досліджено силову взаємодію частинки із зерновим шаром у процесі поділу у випадку, коли площина коливання сита розташована під кутом до горизонту;
- розроблено методику проведення досліджень, стендове обладнання та експериментальні установки та проведено комплекс експериментальних досліджень процесу очищення зернового матеріалу;
- виконано кінетостатичний аналіз запобіжної муфти гвинтового конвеєра та отримати аналітичні залежності для встановлення взаємозв'язку між силовими та конструктивними параметрами;
- встановлено взаємозв'язок між величиною контактних напружень та конструктивними параметрами елементів зачеплення запобіжної муфти конвеєра;
- розроблено динамічну модель процесу роботи запобіжної муфти з визначенням параметрів руху півмуфт при їх осьовому відведенні;
- розроблено методику проведення досліджень, стендове обладнання та експериментальну модель запобіжної муфти для гвинтового конвеєра, що дає можливість оцінити параметри при осьовому відведенні робочого органу у випадку виникнення його перевантаження та проведено комплекс статичних та динамічних досліджень для визначення раціональних конструктивних параметрів і режимів роботи запобіжного пристрою;

- обґрунтувати раціональні параметри шнекового живильника на основі аналізу руху технологічної маси по його поверхні;

- досліджено процес переміщення зернового матеріалу при його транспортуванні у вигляді суцільного потоку із врахуванням його щільності, фізико-механічних властивостей, а також конструктивних і технологічних параметрів пневмотранспортера;

- розроблено конструкцію пневмомеханічного транспортера та експериментальні установки для дослідження процесу переміщення сипких матеріалів з автоматичним підживленням їх потоку струменем повітря та виконано комплекс експериментальних досліджень з визначення впливу параметрів процесу транспортування.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси очищення та транспортування зернових матеріалів, механізми пневмомеханічної дії та процеси спрацювання запобіжних муфт при перевантаженні гвинтових конвеєрах.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились з використанням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, теорії машин і механізмів, основ конструювання деталей машин, а також сучасних методів математичного моделювання. Експериментальні дослідження проводились за галузевими та розробленими методиками на стандартизованому та спеціально сконструйованому і виготовленому обладнанні та приладах. При проведенні експериментальних досліджень застосовувались математичні методи планування багатofакторного експерименту. Обробка отриманих результатів здійснювалась на ПЕОМ за допомогою прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

1. На основі отриманих аналітичних залежностей встановлено взаємозв'язок між конструктивними і кінематичними параметрами та силовими характеристиками запобіжної муфти гвинтового конвеєра: визначено конструктивно-технологічні параметри запобіжної муфти: встановлено характер зміни величини крутного моменту в залежності від кута провертання півмуфт запобіжної муфти на всіх етапах її спрацювання; встановлено взаємозв'язок між величиною контактних напружень та конструктивними параметрами елементів зачеплення запобіжної муфти

гвинтового конвеєра; встановлено вплив основних параметрів на динаміку спрацювання муфти в режимі перевантаження робочого органу.

2. Розроблено математичну модель руху частинки по кромці похилої площини, яка обертається навколо осі обмежуючого циліндра та досліджено силову взаємодію частинки із зерновим шаром у процесі поділу у випадку, коли площина коливання сита розташована під кутом до горизонту.

3. На основі проведеного комплексу наукових досліджень обґрунтовано технологічний процес переміщення зернових матеріалів у технологічних трасах шнекового пневмотранспортера. На цій підставі вперше отримано: математичну модель процесу транспортування зернового матеріалу у вигляді суцільного потоку з врахуванням його щільності, фізико-механічних властивостей, а також конструктивних і технологічних параметрів пневмомеханічного транспортера; математичну модель взаємодії зернового матеріалу з робочим органом шнекового пневмомеханічного транспортера та визначення його оптимальних конструктивно-кінематичних параметрів; раціональні параметри шнекового живильника на основі аналізу руху технологічної маси поверхнею основного елемента конструкції шнекового живильника; емпіричні рівняння регресії, які характеризують зміну продуктивності пневмомеханічного транспортера в залежності від площі східного отвору бункера, частоти обертання шнека та робочого тиску повітря в пневмосистемі.

Практична значимість отриманих результатів полягає в наступному.

Розроблено запобіжну муфту для гвинтового конвеєра, яка дозволить забезпечити осьове відведення перевантаженого шнека в напрямку протилежному до напрямку транспортування матеріалу при автоматичному відновленні робочого стану конвеєра. Розроблено лабораторну установку та методику визначення взаємозв'язку між конструктивними і силовими параметрами запобіжної муфти гвинтового конвеєра, а також її експлуатаційних характеристик. Отримано аналітичні залежності для визначення раціональних конструктивних і кінематичних параметрів запобіжних муфт відносно моменту їх спрацювання.

Розроблено конструкцію пневмомеханічного транспортера для переміщення зернових матеріалів по криволінійних трасах з механізмом автоматичного

підживлення транспортного потоку струменем повітря. Спроековано та виготовлено стенди для дослідження процесу транспортування зернових матеріалів пневмо-шнековим транспортером. Розроблено методика визначення конструктивних і технологічних параметрів пневмомеханічного транспортера в залежності від його продуктивності. Визначено оптимальні конструктивні параметри змінного сопла пневмомеханічного транспортера.

На основі аналітичних та комплексних експериментальних досліджень технічних засобів визначено раціональні конструкційні та режимні параметри зерноочисних машин, параметри робочих органів для очищення зернових матеріалів.

Технічна новизна розробок захищена вісьмома деклараційними патентами України на корисні моделі. За результатами роботи проведені виробничі випробування на ТзОВ «Універст» ЛТД (м. Тернопіль) гвинтового конвеєра із запобіжною муфтою, які підтвердили свою працездатність. Окремі результати роботи впроваджено в навчальний процес при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр за спеціальністю 208 «Агроінженерія» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

У першому розділі «Сучасний стан та аналіз існуючих конструкцій засобів для очищення та транспортування зернових матеріалів» наведено результати аналізу сучасних технологій, конструкційних рішень і способів підвищення ефективності розділення зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями з використанням повітряних потоків. Проведено аналіз стану сучасних технологій та літературно-патентний пошук конструкцій машин та механізмів для здійснення транспортування зернових матеріалів по криволінійних трасах і наведено огляд конструкцій і процесів роботи гвинтових конвеєрів, проаналізовано конструкції та режими роботи запобіжних муфт. Аналіз наукових праць показав, що розрахунок і вибір оптимальних параметрів шнекових робочих органів необхідно здійснювати на основі реалізації моделей безпосередньої взаємодії робочих поверхонь із зерновим матеріалом, враховуючи при цьому його реологічні властивості. Встановлено, що існуючі конструкції робочих органів конвеєрів не в повній мірі задовольняють функціональні вимоги щодо пошкодження

зернових матеріалів при забезпеченні мінімальних енерговитрат на виконання технологічного процесу. Також для підвищення експлуатаційних показників гвинтових конвеєрів необхідно розробити нову конструкцію запобіжної муфти для осевого відведення робочого органу при виникненні перевантаження та забезпечення автоматичного відновлення його початкового положення.

У другому розділі «Теоретичні та експериментальні дослідження процесів очищення зернового матеріалу в пневматичних сепараторах» складено диференціальні рівняння відносного руху матеріальної частинки по кромці похилої площини у вигляді еліпса, яка обертається навколо осі вертикального обмежуючого циліндра. Розроблено вібропневматичний зерновіддільник з інтенсивним розпушуванням зернового шару, який дозволяє збільшити ефективне просівання при збільшенні питомої навантаження на сито до 40-60 кг/(дм²•год). Встановлено, що найбільша інтенсивність розпушування досягається за таких параметрів: частота коливань сита $\omega = 52-57 \text{ с}^{-1}$; амплітуда коливань $A = 5 \text{ мм}$; швидкість повітря, що подається ситом $V_{\text{пр}} = 1,2-1,5 \text{ м/с}$; щільність розміщення прополювача $n_w = 9-11 \text{ п./дм}^2$.

Створено лабораторну установку удосконаленої аспіраційної камери з використанням різних видів розкидачів, отримано нові рівняння регресії ефективності та чіткості процесу сепарації, а також їх графічну інтерпретацію. Експериментально доведено раціональність використання конічного розкидача без лопаток. Встановлено, що оптимальні режимні параметри аспіраційної камери, за яких збільшується ефективність сепарації (76-78%) та чіткість сепарації (98,0-98,8%), знаходиться в межах: швидкість повітряного потоку $v = 7,2 - 7,4 \text{ м/с}$; подача зерна $q = 6-7 \text{ т/год}$; частоті обертання розкидача $n = 100 - 130 \text{ об/хв}$.

Розроблено лабораторну установку модернізованої аспіраційної камери плоскорешітного сепаратора, отримано рівняння регресії ефективності очищення та осадження легких домішок і їх графічна інтерпретація. Встановлено, що максимальну ефективність очищення можна досягти при мінімальних значеннях продуктивності і максимальну ефективність осадження легких домішок 76,3% – за продуктивності 3,95 т/год.

Отримано аналітичні залежності для визначення раціональних конструктивних, енергетичних і кінематичних параметрів пневмовібровідцентрових сепараторів.

У третьому розділі «Теоретичні та експериментальні дослідження шнекового транспортера із запобіжною муфтою» на основі проведеного кінетостатичного аналізу запобіжної муфти гвинтового конвеєра виведено аналітичні залежності зміни крутного моменту спрацювання в залежності від провертання півмуфт механізму на всіх етапах його роботи. Також встановлено межі раціональних конструктивно-технологічних параметрів. На основі проведеного розрахунку за контактними напруженнями виведено умови міцності на різних етапах роботи запобіжної муфти конвеєра, які дозволять підібрати матеріал півмуфт відносно допустимих максимальних напружень на площині контакту $[\sigma]_H$. З метою встановлення адекватності теоретичних розрахунків у програмному забезпеченні *SolidWorks Premium 2012* та *Simulation* було проведено дослідження зміни контактних напружень у зачепленнях кулька-лунка та кулька-канавка запобіжної муфти. Встановлено, що похибка між результатами проведених досліджень знаходиться в межах 11,1...18,5 % для зачеплення кулька-лунка і в межах 10,7...19,8 % для зачеплення кулька-канавка.

На основі проведеного динамічного аналізу процесу роботи запобіжної муфти встановлено, що збільшення частоти її обертання n призводить до зростання обертових моментів системи.

Розроблені конструкції запобіжної муфти гвинтового конвеєра і стендового обладнання з використанням перетворювача частоти *Altivar 71* та програмного забезпечення *Power Suite v.2.5.0* дозволили провести комплекс експериментальних досліджень. Встановлено, що в діапазоні зміни $n = 60...180$ об/хв крутний момент збільшується на 20...25 %. При зміні кута α від 0° до 30° крутний момент T зростає на 30,7...32,5 %; при збільшенні жорсткості пружини c від 16,5 Н/мм до 19,5 Н/мм – T зростає на 30,3...32,4 %; при збільшенні величини зазору Δ від 1 мм до 2,5 мм – T зростає на 18,5...19,4 %; при зміні фракційності транспортованого матеріалу крутний момент T зростає: для піску – на 32,5 %; для пшениці – на 26,3 %; для кукурудзи – на 23,6 %; для керамзиту – на 18,5 %.

Статичні експериментальні дослідження запобіжної муфти дозволили визначити характер її спрацювання, встановити величини максимального крутного моменту на всіх етапах відносного обертання півмуфт.

На основі проведеного багатofакторного експерименту отримано регресійну залежність з визначення впливу кута нахилу робочого органу до горизонту α , частоти обертання робочого органу n , та часу зростання моменту опору T_o . Факторне поле визначалось таким діапазоном зміни параметрів: $0^\circ < \alpha < 40^\circ$; $50 < n < 150$ об/хв; $0,2 < T_o < 0,7$ с. Встановлено, що найбільший вплив на величину T має n (зміна n призводить до зростання T у 2,14 рази). Далі за інтенсивністю впливу на T є величина α (зміна α призводить до зростання T у 1,98 рази) і найменший вплив на величину T має T_o (зміна T_o призводить до падіння T у 1,17 рази).

У четвертому розділі «Теоретичні та експериментальні дослідження пневмо-шнекового транспортера» на основі проведеного конструктивно-технологічного аналізу процесу функціонування напірного шнека та з умови забезпечення технологічності роботи пневмо-шнекового транспортера отримано математичну модель, яка характеризує зміну продуктивності роботи та витрати зернового матеріалу через бункер шнекового живильника залежно від конструктивно-кінематичних і технологічних параметрів шнека та властивостей зернового матеріалу

Проведено розрахунок процесу співудару частинок зернового матеріалу під час транспортування в пневмопроводі. Також одержано математичну модель, яка характеризує загальну енергію, втрачену під час співудару двох частинок, залежно від швидкостей співудару, фізичко-механічних властивостей тіл та умов середовища удару. За результатами проведених досліджень розроблено та виготовлено пневмо-шнековий транспортер з підживленням потоку матеріалу струменями повітря та методики проведення досліджень для визначення залежності продуктивності пневмо-шнекового транспортера від зміни форми та геометричних параметрів сопла, площі отвору бункера, частоти обертання шнекового живильника та величини робочого тиску повітря в технологічній магістралі.

Отримані результати експериментальних досліджень можуть бути використані при розробці промислових конструкцій пневмо-шнекових

транспортерів. Отримані в роботі наукові положення, рекомендації та методики розрахунків і проектування запобіжних муфт гвинтових конвеєрів та пневмошнекових транспортерів рекомендуються до використання у проектно-конструкторських установах та на підприємствах різних галузей машинобудування.

Основні положення роботи було представлено більш ніж на 20 національних та міжнародних конференціях, семінарах, з'їздах, а також у виконанні наукових досліджень Національного університету біоресурсів і природокористування України за державним замовленням: «Розроблення інноваційних високоефективних технологій збирання та переробки енергетичних культур для біогазових установок» (№ державної реєстрації 0117U001254, 2017-2019 рр.); «Розробка теплоелектромеханічного комплексу і енергоощадних технологій на його основі для переробки біомаси та техногенних відходів» (№ державної реєстрації 0117U004403, 2017–2019 рр.); «Розробка нового способу приготування кормів з використанням роторно-пульсаційних апаратів для підвищення якості кормової суміші» (№ державної реєстрації 0119U100822, 2019–2021 рр.). У Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя використовувались дослідження у виконанні контрактних робіт за державним замовленням на тему «Розробка та комплексне дослідження синтезованих транспортно-технологічних механізмів автоматизованих виробничих систем» (№ державної реєстрації 0117U003998, 2017-2019 рр.).

Кількість публікацій за роботою: 80, в т.ч. 1 монографія, 49 статей (21 – у англійських журналах з імпаکت-фактором). Загальна кількість посилань на публікації авторів / h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – 103 / 7, Scopus – 115 / 8, Google Scholar – 507/13. Отримано 8 патентів України. Новизну та конкурентоспроможність запропонованих технічних рішень підтверджено одним актом впровадження. Технічна новизна розробок захищена вісьмома деклараційними патентами України на корисні моделі.

Автори:



ТРОХАНЯК Олександра Миколаївна
ТРОХАНЯК Віктор Іванович