

ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 50

Кропивницький • 2020

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

**DESIGN, PRODUCTION
AND EXPLOITATION
OF AGRICULTURAL MACHINES**

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 50

Kropyvnytskyi • 2020

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2020. Вип. 50. 244 с.

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування. Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 21 грудня 2020 року № 5.

Редакційна колегія: Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Лещенко С.М., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Анікевич Л.В., д.т.н., проф.;
Васильковська К.В., к.т.н., доц.
Васильковський О.М., к.т.н., порф.
Дідух В.Ф., д.т.н., проф.;
Караєв О.Г., д.т.н., ст. наук. співр.;
Кірчук Р.В., к.т.н., проф.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Носуленко В.І., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Павленко І.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Свірень М.О., д.т.н., проф.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Serbia);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Цentrальноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522)
390-581, +380 (522) 390-472, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., накази Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, від 07 листопада 2018 року №1218, від 02 липня 2020 року № 886).

Категорія «Б»

Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus, Word Cat, CrossRef, Open Ukrainian Citation Index, ResearchBib, Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB №23511 - 13351 ПР від 13.07.2018 р.
2414-3820 (Print) 2664-9136 (e) DOI: 10.32515/2414-3820

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.312; 631.316.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.3-11>

С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: serafsgm@ukr.net

Оцінка ефективності глибокого безполицевого обробітку ґрунту

В роботі проводиться оцінка ефективності глибокого безполицевого обробітку ґрунту аналітичними методами. Проаналізовано існуючі дослідження взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин та знарядь з ґрунтом та систематизовано уявлення про представлення ґрунту в теоретичних моделях в вигляді стохастичного процесу послідовних зіткнень поверхні робочого органу із суцільним середовищем, властивості якого задаються певними характеристиками, що описуються відомими законами розподілу. Запропоновано проводити оцінку якості роботи ґрунтообробних машин і знарядь відсотковим вмістом за масою у ґрунті агрегатів заданого розміру та ступенем подрібнення ґрунту.
ґрунтообробний робочий орган, механічний обробіток ґрунту, опір деформації, зміна стану ґрунту, структурні агрегати ґрунту, скиба ґрунту, стохастичний процес послідовних зіткнень

С.Н. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **Д.И. Петренко**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Оценка эффективности глубокой безотвальной обработки почвы

В работе проводится оценка эффективности глубокой безотвальной обработки почвы аналитическими методами. Проанализированы существующие исследования взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий с почвой и систематизированы суждения о представлении почвы в теоретических моделях в виде стохастического процесса последовательных столкновений поверхности рабочего органа со сплошной средой, свойства которой задаются определенными характеристиками, которые описываются известными законами распределения. Предложено проводить оценку качества работы почвообрабатывающих машин и орудий процентным содержанием по массе в почве агрегатов заданного размера и степенью измельчения ґрунту.
почвообрабатывающий рабочий орган, механическая обработка почвы, сопротивление деформации, изменение состояния почвы, -структурные агрегаты почвы, пласт почвы, стохастический процесс последовательных столкновений

Постановка проблеми. Безполицевий обробіток ґрунту є дійсною реальною альтернативою, яка в господарських умовах дозволяє скоротити витрати пального на операції першого глибокого обробітку, відмовитися в технологічних процесах вирощування продукції рослинництва від ерозійно небезпечних знарядь, до яких і відноситься класичний полицевий плуг, та започаткувати основи ґрунтозахисного землеробства [1...3, 12...14]. Ця необхідність впровадження технологій безполицевого обробітку продиктована стрімкою втратою родючості та обезструктуренням ґрунту в результаті впливу антропогенного фактору, подальшого утворення та збільшення

потужності ущільненої підорної підшви, стрімкого погіршення інфільтраційних властивостей, загального загострення проявів вітрової та водної ерозій та ряду інших небезпечних факторів, які в результаті приводять до загальної втрати родючості та перевитрат енергії на обробіток надто ущільнених ґрунтів. Отже, питання впровадження в технологічні процеси вирощування сільськогосподарських культур технологій безполицевого основного обробітку ґрунту є надзвичайно актуальним, та таким, що дозволить практично започаткувати на етапі основного обробітку систему ресурсозберігаючого ґрунтозахисного землеробства та почати реалізовувати ці системи на полях фермерських господарств, тим самим підвищити економічні показники функціонування галузі рослинництва.

Зважаючи на досвід провідних аграрних держав, можна стверджувати, що найбільш доцільно глибокий обробіток ґрунту із обертанням скиби замінити на глибоке розпушування без обертання скиби, при цьому рослинні рештки та стерня попередника може як залишатися на поверхні поля, так і розподілятися та перемішуватися на певну глибину додатковими робочими органами. Для проведення глибокого розпушування найчастіше використовують чизельні глибокорозпушувачі різних конструкцій, при цьому основним робочим органом залишається чизельна лапа, яка може мати прямий чи вигнутий стояк із закріпленими на ньому долотом та різними за конструкціями крилами, зубами, обтічниками та іншими елементами, що впливають на процес і поліпшують кришення ґрунту, підрізання коріння, забезпечують вирівнювання дна борозни чи подовжують термін експлуатації робочого органу в цілому [1...7, 12...14]. Крім того, часто для поліпшення загальних показників роботи глибокорозпушувачів використовують додаткові робочі органи, які можуть бути виготовленими у вигляді зубчастих котків, дисків, борінок та інших робочих органів, які додатково подрібнюють крупні брили, більш ретельно вирівнюють поверхню поля, частково заробляють та перемішують у певному горизонті рослинні рештки, стерню, добрива тощо.

Існує ряд робіт, в яких проводиться обґрунтування окремих конструктивних параметрів глибокорозпушувачів, проте більшість цих обґрунтувань зводиться до інженерного розрахунку та розстановки робочих органів на рамі машини і оцінці енергетики процесу безполицевого обробітку ґрунту, хоча загальну ефективність процесу глибокого безполицевого обробітку ґрунту слід оцінювати не лише з точки зору енергетики, а й з точки зору якості подрібнення монолітів ґрунту, що й заплановано дослідити в розрізі проведених досліджень.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Під час проектування робочих органів ґрунтообробних машин і знарядь, обґрунтування їх основних параметрів і режимів роботи, у переважній більшості випадків, зводиться до експериментальних досліджень із подальшою геометричною побудовою компоновки робочих органів на рамі знарядь виходячи із зон деформацій ґрунту. Це пояснюється відсутністю систематизованих даних про математичний опис властивостей ґрунтів, насамперед різних за складом і властивостями, як об'єкту механічного обробітку, що в кінцевому варіанті унеможлиблює розробку теорії деформації ґрунту від взаємодії з робочими органами ґрунтообробних машин і знарядь.

При проведенні досліджень у цьому напрямку значна увага відводилася вивченню механічної міцності ґрунту та здатності чинити опір деформації. В цьому напрямку, базуючись на використанні основних положень опору матеріалів, базувалися дослідження М.Х. Підгулевського, Я.М. Жука, Т.М. Гологурського [8] та ряду інших дослідників. В свою чергу, ряд інших науковців, серед яких можна виділити В.П. Горячкіна, Н.А. Качинського, Л.В. Погорілого, П.М. Василенка [8], стверджували, що досліджувати зміну стану ґрунтового середовища можна лише на основі

експериментальних польових досліджень із використанням спеціально розроблених приладів і обладнання для визначення стану ґрунту як до, так і після обробки. Такий метод визначення ефективності роботи ґрунтообробних органів, хоч і є найбільш інформативним, проте є дуже затратним як з точки зору часу проведення експериментів, так і з точки зору економічної ефективності, оскільки вимагає практичного виготовлення кожного зразка ґрунтообробних робочих органів та польової перевірки ефективності їх роботи. Теоретично досліджували вплив ґрунтообробних робочих органів на ґрунт В.А. Желіговський, Г.Н. Сінеоков, В.І. Виноградов, А.С. Кушнарьов, В.Ф. Пашенко, І.А. Шевченко, В.І. Ветохін, М.О. Демідко та ін. [3-5; 8, 9].

Під час аналітичного моделювання взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин і знарядь з ґрунтом, різні вчені зовсім по різному представляли модель будови ґрунту, як об'єкту механічного обробітку [3...9]. Незважаючи на різницю у представленні моделі будови ґрунту, проведені дослідження з певними припущеннями можна розділити на чотири основні групи, а саме – це дослідження, у яких модель ґрунту представлена у вигляді твердого тіла, суцільного пружного середовища, суцільного сипучого середовища та суцільного середовища, яке здатне деформуватися. У кожній із наведених моделей ґрунту та впливу на нього робочих органів не враховується те, що ґрунт в дійсних умовах не є однорідним середовищем, яке деформується робочими органами та набуває інших фізико-механічних властивостей. Слід зазначити, що сили щеплення між окремими монолітами ґрунту, які є різними за механічним складом, теж є відмінними за своєю величиною. Це підтверджує судження про те, що в початковому стані ґрунт є суцільним середовищем, яке деформується та складається із окремих елементів, між якими діють більші сили щеплення ніж в граничних зонах ґрунту між елементами. Такі умови моделювання ґрунту забезпечують те, що щільність окремих часток ґрунту відрізняється в певному діапазоні значень, а середнє значення щільності оброблюваного горизонту відповідає загальній щільності пласта. Саме це, на наш погляд, дозволяє найбільш повно з математичної точки зору описати процес взаємодії робочих органів машин і знарядь з ґрунтом, при цьому весь процес взаємодії робочого органу з ґрунтом слід розглядати як стохастичний процес послідовних систематичних зіткнень самого робочого органу, наприклад чизельної лапи, із суцільним середовищем ґрунту, що характеризується щільністю, лінійними розмірами, об'ємними характеристиками тощо, причому зміна параметрів, які визначають властивості середовища, відбувається за певним заданим чи довільним законом розподілу. Чітке визначення і дійсний опис законів розподілу властивостей середовища ґрунту дозволить комплексно змодельовати кришення монолітів ґрунту робочими органами сільськогосподарських машин і знарядь.

Постановка завдання. Отже, метою даної роботи є розробка методики опису аналітичної взаємодії робочих органів машин і знарядь з ґрунтом під час його основного безполицевого обробітку у вигляді стохастичного процесу послідовних зіткнень поверхні робочого органу із суцільним середовищем, властивості якого задаються певними характеристиками, що описуються відомими законами розподілу.

Виклад основного матеріалу. Ґрунт, який є основним об'єктом механічного обробітку у агровиробництві, є однією із найбільш складних та неоднорідних природніх фізико-механічних структур, зміна стану якого неможлива без дії на нього робочих органів машин і знарядь, поглинання енергії від дії цих робочих органів, виникнення деформацій і зрушень, що в кінцевому варіанті і визначає якість роботи ґрунтообробних робочих органів. Отже, цілком логічно, що розглядати та описувати стан ґрунтового середовища можна, якщо останнє знаходиться в незруйнованому робочим органом стані або ж після проведення обробітку, коли структурні агрегати ґрунту займають кінцеве

положення, а робочі органи припиняють свою дію на нього. Перехід стану ґрунту від необробленого до обробленого відбувається в певному просторі на певній поверхні руйнування, в якій відбувається виникнення тріщин, певних деформацій та переміщень в результаті дії сил, що створюються поверхнями робочих органів. Отже, руйнування монолітів ґрунту під час його обробітку необхідно розглядати як процес утворення та подальшої еволюції динамічних тріщин, характер та кількість виникнення яких, у конкретному ґрунтовому об'ємі, визначається кількістю поглиненої енергії від дії робочих органів та дійсних властивостей ґрунту, що обробляється. Варто мати на увазі, що розповсюдження тріщин під час обробітку ґрунту відбувається за шляхом найменшої міцності зв'язків між окремими структурними агрегатами, тобто фактично органічні включення, пори ґрунту, включення вологи та інші подібні елементи є найбільшими осередками утворення, концентрації і подальшого розвитку тріщин при обробітку. Тому, при дослідженні зміни агрегатного стану ґрунту під дією ґрунтообробних робочих органів та адекватного математичного опису даного процесу варто знати характер зовнішніх збурень та наявність і властивості внутрішніх зв'язків оброблюваного ґрунтового середовища.

Одним із найбільш вагомих факторів, що впливає на процес кришення необробленого ґрунту є його механічний склад, який характеризується кількістю, взаємним розміщенням та взаємозв'язком дискретних частинок ґрунтового середовища, які зрештою визначають співвідношення твердої, рідкої та газоподібної фаз ґрунту. В нашій державі найбільш поширеними за механічним складом є супіщані, суглинкові та глинисті ґрунти [8], причому види зв'язків між їх окремими елементами характеризуються різними параметрами. Наприклад, суглинкові ґрунти характеризуються практично рівним співвідношенням фізичної глини і фізичного піску, що переводить їх в категорію зв'язних і таких, що мають здебільшого пружні зв'язки між твердими компонентами. Під час обробітку таких ґрунтів спостерігається їх зминання (стиснення, ущільнення) під час дії на них робочих органів і елементів ґрунтообробних машин. Якщо такі ґрунти є досить пористими, а вміст вологи в них є достатньою, але не надто високою, то вони задовільно кришаться, при цьому розділяються не на окремі компоненти, що має місце у супіщаних і піщаних ґрунтах, а на грудки різних розмірів і форм, на що впливає наявність у суглинкових ґрунтах великої кількості мулистих часток, які надають пластичних властивостей.

Найскладніше піддаються механічному обробітку ґрунти з високим вмістом фізичної глини, оскільки вони характеризуються найбільшою міцністю зв'язків пружного характеру, кількість яких в Україні зростає з року в рік [1]. В таких ґрунтах зв'язуючими елементами виступають мулисті частки, які дуже щільно розміщені і притиснені одна до одної. За умов достатньої кількості вологи у глинистих ґрунтах, але не при її перевищенні, для них характерна деформація стиснення, яку можна описати законом Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

де σ – напруження;

E – модуль пружності;

ε – відносна деформація.

В свою чергу між модулем пружності і тиском існує взаємозв'язок, який визначив К. Терцагі [10]

$$E = c \cdot P, \quad (2)$$

де c – константа, яка залежить від властивостей матеріалу;

P – тиск.

Такі глинисті ґрунти, особливо при їх пересушенні, характеризуються високою міцністю зв'язків окремих структурних елементів. Це призводить до того, що їх обробітку вимагає значних витрат енергії, оскільки вони дуже погано кришаться, а результатом їх обробітку є утворення великої кількості крупних брил. Останнє потребує проведення додаткових операцій по їх подрібненню під час наступних технологічних операцій обробітку ґрунту чи використання додаткових робочих органів для аналогічних цілей в межах однієї машини.

Взаємодію робочих органів машин і знарядь із ґрунтом найбільш доцільно проводити, моделюючи роботу у товщі середовища двогранного клина із врахуванням механічного складу ґрунту, що запропоновано Ю.А. Ветровим [11]. У цьому випадку процес різання розглядається подібно до роботи металорізального інструменту, наприклад різця, та залежно від того яким чином відбувається відділення скиби від моноліту необробленого ґрунту, запропоновано їх класифікувати на злитну ступінчасту, елементну та скибу відриву [8].

Під час реальної роботи ґрунтообробних машин і знарядь в полі за умов важких і середніх суглинків, ґрунт сколюється, утворюючи скиби елементного типу (рис. 1), які, як і скиби відриву, складаються із окремих грудок, але при цьому їх форма і розміри мають закономірний характер. Так, з боку робочої поверхні робочого органу вони обмежені площиною, що утворюється внаслідок зминання ґрунту, з протилежної ж сторони – поверхня грудки задається початковою поверхнею ґрунту, поверхня відділення із зовнішньою поверхнею робочого органу (клина) утворює гострий кут, а завершальна сторона грудки обмежується обрисами попереднього елемента скиби, за умови того, що вона є укороченою зі сторони робочої грані клина, що має місце внаслідок зминання ґрунту. За таких умов відділення скиби від загального моноліту необробленого ґрунту, відділений елемент ковзає вздовж робочої грані клина. Сила опору ґрунту досягає максимальних значень $P_{\max}$ тоді, коли відбувається відділення елемента скиби, далі ж відбувається стрімке падіння цього параметру до найнижчих значень $P_{\min}$, які відповідають опору зминанню ґрунту за умов проникнення леза клина в ґрунт без сколювання. Далі клин, переміщуючись у товщі ґрунту від Δl до l_c збільшує поверхню контакту робочої грані із частками, при цьому спостерігається підвищення тиску та сумарної сили опору, при досягненні критичної межі якої знову сколюється проміжний елемент ґрунту, а сила опору знову падає на короткий час до найнижчих значень $P_{\min}$. Далі процес повторюється, а подальше переміщення клина в ґрунтовому середовищі забезпечує сколювання і витіснення наступного елемента. Отже, процес відділення та кришення окремих елементів ґрунту, залежно від фізико-механічних та технологічних властивостей оброблюваного середовища, може суттєво відрізнятися.

Якщо допустити, що розміри проміжних елементів під час роботи ґрунтообробних машин і знарядь збільшуються по мірі їх віддалення від робочої грані клина до поверхні поля, то середнє значення розмірів розміщених на поверхні поля грудок знаходиться в прямій залежності із періодичністю сколювання клином монолітів ґрунту T . Тоді загальна сумарна кількість елементів n , на які розділяється відділена клином скиба ґрунту за секунду часу знаходиться за співвідношенням:

$$n = \frac{V \cdot T}{l_c}, \quad (3)$$

де V – швидкість руху робочого органу в ґрунті;

l_c – довжина сколеної ґрунтообробним робочим органом скиби ґрунту.

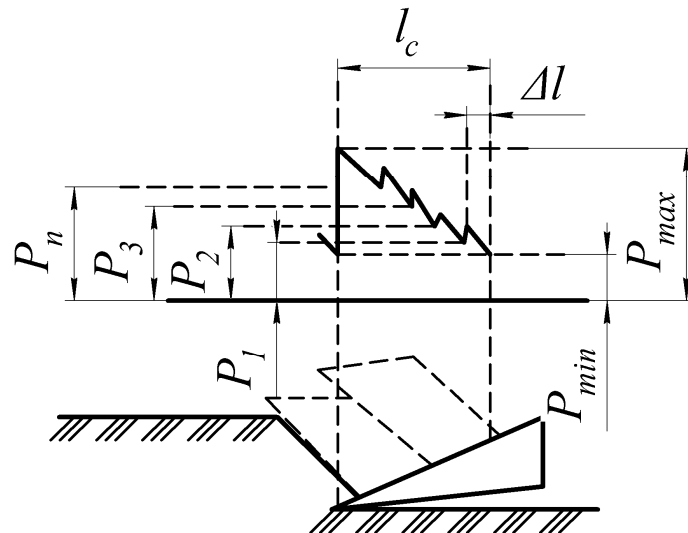


Рисунок 1 – Схема відділення окремих елементів ґрунту при механічному обробці клином та характер зміни сил опору при цьому

Джерело: розроблено авторами з використанням [8, 11]

Отже, робочий орган, рухаючись у ґрунті на певній глибині провокує виникнення тріщин, які утворюються по поверхням найменшої міцності зв'язків між окремими структурними елементами ґрунту. Оскільки весь процес супроводжується пластичною деформацією ґрунту та його ущільнення за рахунок витіснення із порожнин повітря, відбувається поглинання енергії, якої йде менше на подрібнення, а отже силове поле, яке створюється робочим органом, по мірі віддалення від нього поступово затухає, і, відповідно, кількість утворених тріщин теж зменшується. Логічно, що кількість тріщин та розміри і кількість грудок після обробки знаходяться між собою в лінійній залежності, а це значить, що для якісного вивчення зміни агрегатного стану під час обробки ґрунту робочими органами і знаряддями, достатньо дослідити процес та еволюцію тріщиноутворення. З точки зору механіки процесу утворення тріщин, об'єм ґрунту під дією робочого органу спочатку стискається, що супроводжується витісненням повітря і зменшенням скважності, а вже потім моноліти ґрунту рухаються та зміщуються в напрямку дії вектора сил. Зважаючи на те, що швидкість та траєкторії переміщення агрегатів ґрунту по поверхні клина будуть різними, це і сприяє подрібненню необробленого ґрунту на значну кількість дрібних часток.

Моделюючи ґрунтове середовище, його найбільш доцільно представляти як пружньо-пластичну структуру, в якій зв'язок між різними видами напружень має лінійний характер та описується наступною залежністю:

$$\tau_n = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 + k_3, \quad (4)$$

де σ_n і τ_n – відповідно нормальні та дотичні напруження;

φ_2 – кут внутрішнього тертя;

k_3 – коефіцієнт зчеплення.

Оцінити якість роботи ґрунтообробних машин і знарядь можна за відсотковим вмістом по масі у ґрунті агрегатів певного розміру. Так, для безполицевого обробки ґрунту глибокорозпушувачами у якості цього параметру розраховують відсотковий вміст за масою агрегатів з розмірами менше 50 мм, а цей показник має знаходитися в межах 65...75%. Виразивши цей показник в долях одиниці від маси чи об'єму, отримаємо ймовірність утворення при обробці агрегатів заданого розміру, що

фактично і характеризує ступінь подрібнення ґрунту. Тоді можемо знайти показник якості обробітку ґрунту C за залежністю

$$C = (1 - P_0) \cdot 100\%, \quad (5)$$

де P_0 – ймовірність забезпечення необхідних розмірів агрегатів ґрунту при його обробітку робочими органами, для безполицевого обробітку $a \geq 50$ мм.

В свою чергу ступінь подрібнення ґрунту S_{II} теж знаходиться у певному зв'язку із ймовірністю забезпечення необхідних розмірів агрегатів ґрунту при обробітку

$$S_{II} = 1 - P_0. \quad (6)$$

Однак, доречніше ступінь подрібнення ґрунту S_{II} розглядати не як абсолютну, а як відносну величину, що можна описати рівністю:

$$S_n = \frac{P_{0Pi} - P_{0ki}}{P_{0Pi}} = 1 - \frac{P_{0ki}}{P_{0Pi}}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

де P_{0Pi} , P_{0ki} – відповідно, початкові та кінцеві значення ймовірності P_0 , якщо ґрунт обробляється кількома агрегатами чи наборами робочих органів n .

Висновки. 1. Ступінь подрібнення ґрунту при його безполицевому обробітку можна оцінювати ймовірністю, а якість роботи знарядь – відсотковим вмістом в загальній масі обробленого ґрунту часток, розміри яких не більші за 50 мм.

2. При моделюванні безполицевого обробітку ґрунту процес подрібнення можна розглядати у вигляді взаємодії двогранного клина з суцільним структурованим шаром ґрунту, що володіє заданими властивостями.

3. Взаємодія безполицевого робочого органу з ґрунтом супроводжується деформацією ґрунтового середовища, збільшенням напружень та виникненням тріщин, що в кінцевому результаті задають форму та розміри подрібнених агрегатів. Вважаємо, що кількість і характер тріщин, які виникають при обробітку ґрунту, знаходяться в прямо пропорційній залежності із розмірами отриманих агрегатів по завершенню робіт.

Список літератури

1. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Мачок Ю.В., Богатирьов Д.В. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.
2. Руденко Н.Е. Механизация обработки почвы: уч. пособ. Ставрополь: Изд-во СтГАУ «АГРУС». 2005. 112 с.
3. Панов И.М., Ветехин В.И. Физические основы механики почв: монография. К.: Феникс, 2008. 266 с.
4. Пащенко В.Ф., Корниенко С.И., Гусаренко Н.П. Теория воздействия рабочих органов орудий на почву: монография. Харьков: ХНАУ, 2013. 90 с.
5. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
6. Корабельский В.И., Погорелый В.В. Технологические основы формообразования криволинейных рабочих органов рыхлителей. Труды Таврической гос. агротехн. академии. Мелитополь. 2006. Вып. 40. С. 74–82.
7. Борисенко И.Б. Совершенствование ресурсосберегающих и почвозащитных технологий и технических средств обработки почвы в острозасушливых условиях нижнего Поволжья: дис... д-ра техн. наук: 05.20.01. Волгоград, 2006. 402 с.
8. Сало В.М. Науково-технологічні основи обґрунтування складу та параметрів комбінованих ґрунтообробних знарядь: дис... д-ра техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2008. 278 с.
9. Кушнарев А.С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву: дис... д-ра техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 1981. 329 с.

10. Костюченко М.М. Механіка ґрунтів: навч. посіб. Інтернет-ресурс Київського університету. geol.univ@kiev.ua . К.: 2013. 116 с.
11. Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами. М.: Машиностроение, 1971. 360 с.
12. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Оцінка енергоємності глибокого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2018. Вип. 31. С. 10–20.
13. Вплив конструктивних параметрів чизельної лапи глибокорозпушувача на деформацію ґрунту / С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, І.О. Лісовий. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2016. Вип. 4. С. 115-124.
14. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting / K.V. Vasylovskaya, S.M. Leshchenko, O.M. Vasylovskiy, D.I. Petrenko. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2016. Vol.50. No.3. P.13-20 ref.18.

Referencis

1. Salo, V.M., Leshchenko S.M., Luzan, P.G., Machok Yu.V. & Bogatir,`ov D.V. (2016). *Mashyny dlia obrobittu ґрунту ta vnesennia dobrov. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei [Tillage and fertilizer machines. A textbook for students of agricultural specialties]*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
2. Rudenko, N.E. (2005). *Mekhanizatsiya obrabotky pochvi [Mechanization of soil tillage]*. Uchebnoe posobie. Stavropol: Yzd-vo StHAU «AHRUS» [in Russian].
3. Panov, Y.M. & Vetokhyn, V.Y. (2008). *Fyzicheskiye osnovy mekhaniky pochv [Physical bases of soil mechanics]*. Monohrafiya. K.: Fenyks [in Russian].
4. Pashchenko, V.F., Korniyenko, N.P. & Husarenko, S.Y. (2013). *Teoriya vozdeistviya rabochykh orhanov orudyi na pochvu [Theory of the impact of the working bodies of guns on the soil]*. Monohrafiya. Kharkov : KhNAU [in Russian].
5. Shevchenko, I.A. (2016). *Keruvannya agrofizichnim stanom ґрунтового середовища [Management of Agrophysical Condition of Soil Environment]*. K.: Vidavnychij dim «Vinichenko» [in Ukrainian].
6. Korabelskiy, V.I. & Pogorelyj, V.V. (2006). *Tehnologicheskie osnovy formoobrazovaniya krivoliniynykh rabochih organov ryhlitelej [Technological bases of shaping of curvilinear working bodies of rippers]*. *Trudy Tavricheskoj gos. agrotehn. akademii. Melitopol, Vol.40*, 74–82 [in Russian].
7. Borysenko, Y.B. (2006). *Sovershenstvovanye resursosberehaiushchykh y pochvozashchytnikh tekhnolohiy y tekhnicheskikh sredstv obrabotky pochvi v ostrozashchytykh usloviyakh nyzhnego Povolzhia. [Improving resource-saving and soil-protective technologies and technical means of tillage in the arid dry conditions of the lower Volga region]*. Dys...doktora tekhn. nauk: 05.20.01. Volhohrad [in Russian].
8. Salo, V.M. (2008). *Naukovo-tehnologichni osnovy obgruntuvannya skladu ta parametriv kombinovanykh ґрунтообробних знаряд. [Scientific and technological bases of substantiation of composition and parameters of combined tillage tools]*. Dys... doktora tekhn. nauk: 05.05.11. Kirovohrad [in Ukrainian].
9. Kushnarev, A.S. (1981). *Mekhaniko-tehnologicheskie osnovy prozessa vozdeystviya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushhih mashin i orudiy na pochvu. [Mechanical and technological bases of the process of impact of working bodies of tillage machines and tools on the soil.]*. Dis... d-ra tekhn. nauk: 05.20.01. Chelyabinsk [in Russian].
10. Kostyuchenko, M.M. (2013) *Mekhanika ґрунтів: Navchalnyi posibnyk. [Soil Mechanics: Manual]*. Internet-resurs Kyivskoho universytetu. [in Ukrainian].
11. Vetrov, Yu.A. (1971). *Rezanye hruntov zemleroinimy mashynamy. [Soil cutting with earthmoving machines]*. M.: Mashynostroeniye [in Russian].
12. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. & Petrenko, D.I. (2018). *Otsinka enerhoiemnosti hlybokoho obrobittu ґрунту kombinovanyimi chyzelnymi hlybokorozpushuvachamy [Assessment of energy intensity of deep cultivation of soil by combined chisel deep tillers]*. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentralnoukrainskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia*. Kropyvnytskyi: CNTU, Vol. 31, 10–20 [in Ukrainian].
13. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Petrenko, D.I. & Lisovyi, I.O. (2016). *Vplyv konstruktyvnykh parametriv chyzelnoi lapy glybokorozpushuvacha na deformatsiiu ґрунту [Influence of design specifications of chisel shank of a deep tiller on soil deformation]*. *Visnyk Ukrainkoho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity*. Kherson: OLDI-PLIuS, Vol. 4, 115-124 [in Ukrainian].

14. Vasylovskaya, K.V., Leshchenko, S.M., Vasylovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering, Vol.50, 3*, 13-20 [in English].

Serhii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., DSc., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Evaluation of the Efficiency of Soil with Deep Chiseling

The paper presents the evaluation of effectiveness of deep chiseling with the help of analytical methods. General objective of the work is to develop the method for describing theoretical interaction of operating parts of machines and tools with soil during main chiseling in the form of a stochastic process of successive hits of the operating part with a solid medium.

The destruction of monoliths (uncultivated) soil during its cultivation was considered as a process of formation and subsequent evolution of dynamic cracks, the nature and amount of which, in a particular soil volume, is determined by the amount of energy absorbed by operating parts and the actual properties of cultivated soil. It should be taken into consideration that the spread of cracks during chiseling occurs by the lowest strength of connections between certain structural units, in fact organic inclusions, soil pores, moisture inclusions and other similar elements are the largest centers of formation, concentration and further development of cracks during cultivation. Interaction of operating parts of machines and tools with soil is most expedient to carry out modeling work in a thickness of the environment of a dihedral wedge taking into account mechanical structure of soil. It is established that the number of cracks and the size and number of lumps after cultivation are linearly dependent, which means that to qualitatively study the change in physical state, during chiseling with operating parts and tools, it is enough to study the process and evolution of cracking.

As a result of the work performed, it is proved that the degree of soil grinding during its chiseling can be assessed by probability, and the quality of tools, that is the percentage of total mass of cultivated soil particles with the size not exceeding 50 mm. When modeling chiseling, the grinding process can be considered in the form of interaction of a dihedral wedge with a solid structured layer of soil with specified properties. The interaction of the chiseling operating part with the soil is accompanied by deformation of soil environment, increased stresses and cracks, which ultimately determine the shape and size of the crushed units. We believe that the number and nature of cracks that occur during tillage are in direct proportion to the size of the obtained units upon completion.

chiseling operating part, mechanical soil cultivation, deformation resistance, change of soil condition, structural aggregates of soil, soil slice, stochastic process of successive hits

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.816.33

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.12-19>

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук, **Д.Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук,
С.І. Дейкун, фахівець
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*
e-mail: viktor.deikyn@gmail.com

Вплив параметрів розподільника на якість розсіювання добрив у підлаповому просторі

У статті представлені результати теоретичного дослідження процесу транспортування та розподілу гранул мінеральних добрив після відбиття від площини розподільника у підлаповому просторі плоскоріжучого робочого органу. Обґрунтовані геометричні параметри та кути розташування площини відбиття.

швидкість частинки, розподільник, поверхня відбиття, дальність польоту

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук, **Д.Ю. Артёменко**, доц., канд. техн. наук, **С.И. Дейкун**, специалист
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Влияние параметров распределителя на качество рассеивания удобрений в подлаповом пространстве

В статье представлены результаты теоретического исследования процесса транспортировки и распределения гранул минеральных удобрений после отражения от плоскости распределителя в подлаповом пространстве плоскорезущего рабочего органа. Обоснованы геометрические параметры и углы расположения плоскости отражения.

скорость частицы, распределитель, поверхность отражения, дальность полета

Постановка проблеми. Отримання стабільних врожаїв в рослинництві в даний час неможливе без застосування встановлених доз мінеральних добрив. Існуючі ж способи внесення, в більшості випадків, не забезпечують їх ефективного засвоєння рослинами, так як, в кращому випадку відповідні робочі органи нерівномірно розподіляють добрива по всій глибині загортання в ґрунт. Більш ефективним може бути спосіб внутрішньогрунтового внесення з використанням лапових або плоскоріжучих робочих органів. У цьому випадку виникає проблема рівномірного розподілу добрив по ширині захвату і, відповідно, по площі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На вирішення даної проблеми направлено праці багатьох конструкторів та авторів [3, 6, 7, 8], але більшість з них ставлять за мету забезпечити рівномірний розподіл посівного матеріалу або добрив по площі оброблюваної поверхні за рахунок конструктивних та інших параметрів одного елемента в послідовності транспортування їх в ґрунт – розподільника. Конструкторами запропоновано та запатентовано велику кількість розподільників різноманітних за конструкцією та геометричною формою [3]. Більшість з них мають занадто складну геометричну форму, або ж їх форма суттєво адаптована під конкретні геометричні параметри лапи та інших суміжних елементів конструкції робочих органів.

У результаті цього істотно зростає складність його конструкції, але кінцевий бажаний результат залишається негарантованим.

Дослідженнями конструкцій подібних робочих органів та процесів розподіл посівного матеріалу або внесення добрив ґрунтовно займалися наступні вчені: М.Б. Гіллєс, П.В. Сисолін, В.О. Зирянов, В.І. Мельник, В.М. Сало, В.В. Ратушний, І.А. Долгов, В.В. Адамчук, В.Ф. Пащенко, В.І. Пастухов, В.Б. Онищенко.

Під час аналізу праць було встановлено вплив основних технологічних факторів та конструктивних параметрів на ефективність функціонування розподільника. Це дало змогу сформулювати робочу гіпотезу стосовно можливості оптимізувати процес внутрішньогрунтового внесення гранульованих мінеральних добрив одночасно з виконанням основного безполицевого обробітку ґрунту.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування геометричних параметрів розподільника, які здатні забезпечити максимальну дальність польоту часток добрив у підлаповому просторі.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що частки матеріалу, що направляються відповідно до заданих траєкторій у попередньо передбачені зони поверхні борозни, утвореної робочим органом, при контакті з ґрунтом істотно перерозподіляються, і сенс традиційного підходу до забезпечення рівномірності повністю втрачається. Крім цього, необхідно враховувати те, що для розміщення добрив в ґрунті, в більшості випадків, використовуються плоскоріжучі (лапові) робочі органи. Для нормальної роботи, з точки зору заглиблення в ґрунт, їх необхідно встановлювати з нахилом вперед під кутом до 3° . У результаті цього дно борозни, яку вони утворюють, набуває конічних обрисів з нахилом до центру. У цьому випадку стає очевидним, що матеріал необхідно подавати не рівномірно по ширині робочого органу, а більшу його частину направляти на чітко встановлену відстань в напрямку, перпендикулярному його осі. Чисельне значення цієї відстані визначається характером перерозподілу гранул в результаті контакту з ґрунтом. У процесі скочування гранул або частинок до центру рівномірність розподілу буде відновлюватися.

У зв'язку з цим виникає необхідність вирішення завдання забезпечення максимальної дальності польоту частинок в поперечному напрямку з використанням максимально простої геометрії поверхні розподільника. На наш погляд, такою поверхнею може бути призма (рис. 1).

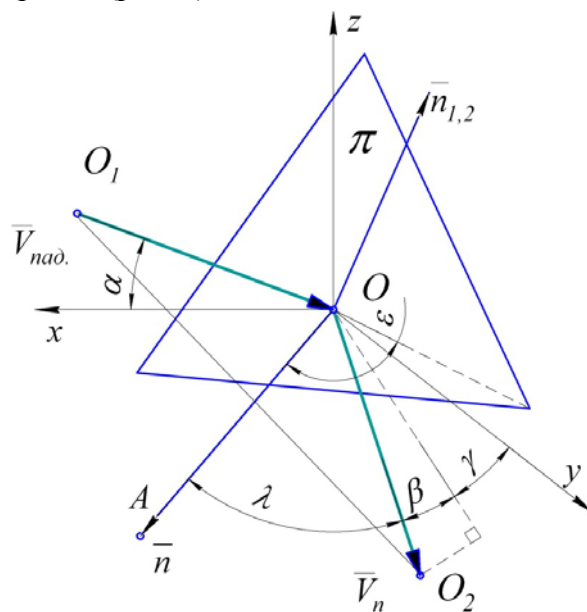


Рисунок 1 – Схема контакту частинок добрив з площиною відбиття

Джерело: розроблено авторами з використанням [3]

Розглянемо процес переміщення гранул добрив наступним шляхом: вихід з тукопроводу, контакт з розподільником, відбиття, політ в напрямку, поперечному напрямку руху робочого органу.

Компоненти швидкості частинок після удару об площину π можна визначити, склавши рівняння їх вільного польоту у вертикальній площині $OY_\gamma Z$, де вісь OY_γ отримана в результаті повороту осі OY в площині на кут γ , в проекціях на осі OY_γ і OZ :

$$m\ddot{y}_\gamma = -k\dot{y}_\gamma; \quad m\ddot{z} = -mg - k\dot{z}. \quad (1)$$

Ввівши позначення

$$\dot{y}_\gamma = v_{y_\gamma}, \quad \dot{z} = v_z, \quad \ddot{y}_\gamma = (v_{y_\gamma})'_t, \quad \ddot{z} = (v_z)'_t \quad (2)$$

рішення рівнянь (1) можна записати у вигляді:

$$\ln \left| \frac{g + \frac{k}{m} v_z}{C_2} \right| = -\frac{k}{m} t;$$

або

$$v_{y_\gamma} = C_1 e^{-\frac{g}{V_B} t}; \quad v_z = -V_B + C_2 e^{-\frac{g}{V_B} t} \quad (3)$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов

$$v_{y_\gamma} \Big|_{t=0} = v_{y_{\gamma 0}} = V_{\pi 0} \cos \beta, \quad v_z \Big|_{t=0} = v_{z0} = V_{\pi 0} \sin \beta \quad (4)$$

$$V_{\pi 0} = V_{\text{пад}} \sin \varepsilon \sqrt{1 + \mu^2 \operatorname{ctg}^2 \varepsilon}. \quad (5)$$

Із (3), (4) отримуємо

$$C_1 = V_{\pi 0} \cos \beta; \quad C_2 = V_B + V_{\pi 0} \sin \beta. \quad (6)$$

і рішення (6) набувають вигляду:

$$v_{y_\gamma} = V_{\pi 0} e^{-\frac{g}{V_B} t} \cos \beta; \quad v_z = -V_B + (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) e^{-\frac{g}{V_B} t}. \quad (7)$$

Для визначення дальності польоту потрібно знати час польоту. Його визначаємо, вирішивши рівняння для визначення швидкості v_z . Враховуючи (2), перше рівняння в (7) набуває вигляду:

$$\dot{z}_t = -V_B + (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) e^{-\frac{g}{V_B} t}.$$

Рішенням цього рівняння є

$$z = -V_B t - (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) \frac{V_B}{g} e^{-\frac{g}{V_B} t} + C_3,$$

де C_3 – постійна інтегрування, яка визначається з початкових умов $z = 0$ при $t = 0$:

$$C_3 = (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) \frac{V_B}{g}.$$

З урахуванням постійної інтегрування, вираз для визначення дальності польоту часток до контакту з перешкодою:

$$z = -V_B t + (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) \frac{V_B}{g} \left(1 - e^{-\frac{g}{V_B} t} \right). \quad (8)$$

Звідси, час польоту до зустрічі із землею являється рішенням рівняння:

$$-V_B t_p + (V_B + V_{\pi 0} \sin \beta) \frac{V_B}{g} \left(1 - e^{-\frac{g}{V_B} t_p} \right) - h_p = 0, \quad (9)$$

де h_p – висота падіння частки після удару об площину.

Зміна горизонтальної координати точки потрапляння частки на землю визначиться шляхом рішення першого рівняння (7). Враховуючи (2), маємо

$$y = -\frac{V_{\pi 0} V_B}{g} e^{-\frac{g}{V_B} t} \cos \beta + C_4, \quad (10)$$

де C_4 – постійна інтегрування.

Постійна інтегрування C_4 зміни горизонтальної координати (10) набуває вигляду

$$y = \frac{V_{\pi 0} V_B}{g} \left(1 - e^{-\frac{g}{V_B} t} \right) \cos \beta. \quad (11)$$

Підставивши в останню залежність час t з (9), отримаємо зміну горизонтальної координати:

$$y_p = \frac{V_{\pi 0} V_B}{g} \left(1 - e^{-\frac{g}{V_B} t_p} \right) \cos \beta. \quad (12)$$

Знайдемо зв'язок між кутами β , γ (рис. 1), які задають напрямок швидкості частки в момент відбиття від поверхні π , і кутами φ , θ , які задають положення симетричної лінії відносно координатної площини OXZ призми $ABCO$, де φ – кут, який утворюють ребра OA з площиною OXY ; 2θ – двогранний кут при ребрі OA (рис. 2). Вказаний зв'язок знайдемо з умови

$$\bar{n}_1 = \bar{n} \quad (13)$$

де $\bar{n}_1$ – одиничний вектор, який являється зовнішньою нормаллю грані OCA , яка являється фактично площиною відбиття π .

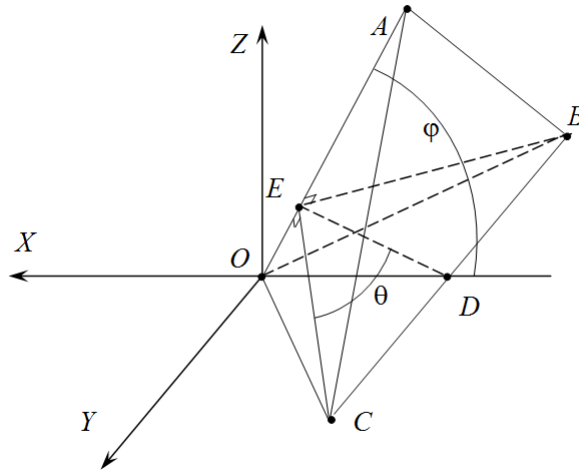


Рисунок 2 – Взаємозв'язок між кутами, які задають напрямок вектора швидкості частини після відбиття від площини π , і кутами, які задають положення призми відбиття

Джерело: розроблено авторами

Знайдемо нормаль $\bar{n}_1$ до площини відбиття. Нехай $OA = L$ і площина ABC перпендикулярна до OA , тоді (рис. 1) маємо

$$\bar{n}_1 = \frac{\overline{OC} \times \overline{OA}}{|\overline{OC} \times \overline{OA}|} \quad (14)$$

де $\overline{OA} = (-\cos \varphi; 0; \sin \varphi)^T$,

$$\overline{OC} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \sec^2 \theta}} (-1; \sin \varphi \operatorname{ctg} \theta; 0)^T.$$

Таким чином

$$\begin{aligned} \overline{OC} \times \overline{OA} &= \frac{1}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \sec^2 \theta}} \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -1 & \sin \varphi \operatorname{tg} \theta & 0 \\ -\cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{vmatrix} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \varphi + \sec^2 \theta}} (\sin \varphi \operatorname{tg} \theta; 1; \cos \varphi \operatorname{tg} \theta)^T \end{aligned}$$

і

$$\bar{n}_1 = (\sin \varphi \sin \theta; \cos \theta; \cos \varphi \sin \theta) \quad (15)$$

Враховуючи (15), із рівності (13) маємо:

$$\begin{cases} n_y = \cos \theta, \\ n_z = \cos \varphi \sin \theta, \end{cases}$$

$$\text{де } n_y = \frac{C_{\beta\gamma}}{\sqrt{1+C_{\beta\gamma}^2}} \sin \varepsilon, \quad n_z = \sin \alpha \cos \varepsilon + \frac{\cos \alpha \sin \varepsilon}{\sqrt{1+C_{\beta\gamma}^2}}.$$

Таким чином,

$$\begin{cases} \theta = 2 \arccos n_y, \\ \varphi = \arccos \frac{n_z}{\sqrt{1-n_y^2}}. \end{cases} \quad (16)$$

Графічна інтерпретація отриманих аналітичних залежностей з використанням програмного забезпечення MathCAD 15 (рис. 3) дозволяє провести попередній аналіз.

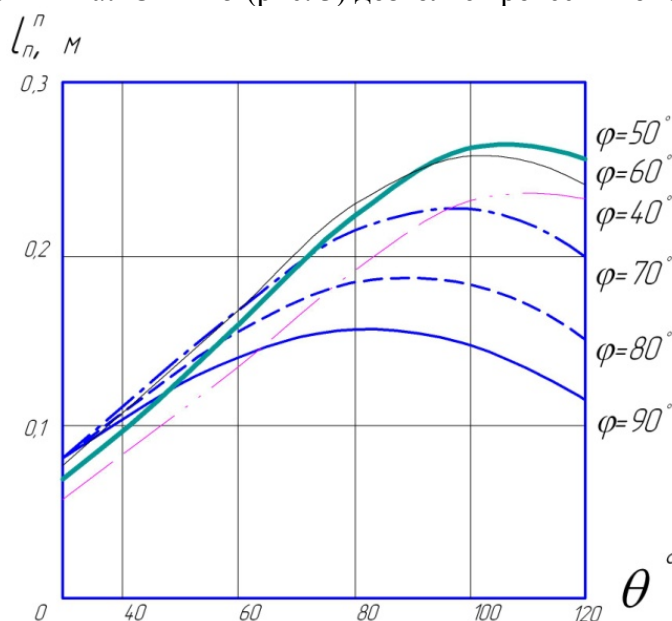


Рисунок 3 – Залежність дальності поперечного польоту гранул l_n^n від кута θ між гранями розподільника при фіксованому нахилі ребра призми φ

Джерело: розроблено авторами

За умови значень вихідних параметрів: швидкість витання – $V_e = 10$ м/с; висота розташування розподільника над поверхнею дна борозни – $h = 0,05$ м; швидкість гранул на виході з тукопроводу – $V_{nad} = 1,7$ м/с; відстань від виходу з тукопроводу до поверхні відбиття – $\ell = 0,05$ м; коефіцієнт відновлення при ударі об перешкоду $\mu = 0,9$.

Так, максимальної дальності польоту гранул при фіксованому значенні кута μ нахилу ребра розподільника можна досягти, якщо кут між гранями становить $\theta = 90 \dots 110^\circ$ в залежності від значень кута φ .

Характерним є те, що зі зниженням значення кута φ від 90° до 50° прогнозоване значення дальності поперечного польоту гранул збільшується, а подальше зниження значення кута φ забезпечує його зниження.

Висновки. Отримані залежності дозволяють обґрунтовано встановити

геометричні параметри розподільника, який забезпечить задану дальність польоту часток матеріалу для робочих органів різної ширини захвату і досягати бажаного результату з урахуванням закономірностей їх перерозподілу при контакті з ґрунтом.

Список літератури

1. Бутенин, Н. В., Лунц, Я. Л., Меркин, Д. Р. Курс теоретической механики. Т.2. М. : Наука, 1985. 496 с.
2. Дейкун В. А., Сало В. М., Гончарова С. Я. Вплив конструктивних параметрів тукопровода на швидкість потоку гранул добрив. *Збірник праць НУБІП*. 2012. URL: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_7/12svm.pdf (дата звернення: 03.03.2020)
3. Дейкун В. А. Обґрунтування параметрів робочого органа для внутрішньогрунтового внесення мінеральних добрив : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Кіровоград. нац. техн. ун-т, Кіровоград, 2013. 190 с.
4. Домрачев В. А., Кем А. А., Михальцов Е. М. Исследование процесса распределения семян в подсошниковом пространстве. *Информационные технологии, информационные измерительные системы и приборы в исследовании сельскохозяйственных процессов. Ч. 1*. сб. матер. регион. науч.-практ. конф. «АГРОИНФО'2000». РАСХН. Сиб. отд-ние. Новосибирск, 2000. 338 с.
5. Ковбаса В.П., Дейкун В.А. Визначення умов розсіювання частинок мінеральних добрив у підлаповому просторі. *Агроінженерні дослідження*. Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2008. №12(2). С. 180-182.
6. Робочий орган для локального внесення мінеральних добрив чи посіву : заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет: пат. 129713. Україна : МПК А01В 49/06 (2006.01). № у 2018 04789 ; заявл. 02.05.2018 ; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21.
7. Перетятко А.В., Ивженко, С.А., Брежнев А.Л. Теоретическое обоснование геометрических параметров направителя-распределителя семян лапового сошника. *Актуальные проблемы сельскохозяйственной науки и образования*. 2005. Вып. 3. С. 96-101.
8. Романишин О.Ю., Заєць М.Л. Сошник для підґрунтового-розкидного способу сівби зернових культур. *Зб. наук. пр. ХТУСГ ім. Петра Василенка*. 2007. № 9. С. 238-242.
9. Романюк Г.С. К обоснованию параметров распределительно-высевающего устройства. *Совершенствование рабочих органов сельскохозяйственных машин: Сб. н. тр. УСХА*, 1988. С. 48-53.
10. Эльсгольд Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969. 424 с.

Referencis

1. Butenyn, N.V., Lunts, Y.A.L. & Merkin, D. R. (1985). *Kurs teoretychnoyi mekhaniky [The course of theoretical mechanics]*. (Vol.2). Moskow : Nauka [in Russian].
2. Deykun, V.A., Salo V.M. & Honcharova, S. YA. (2012). Vplyv konstruktyvnykh parametriv tukoprovodu na shvydkist' potoku hranul dobryv [Influence of structural parameters of fertilizer tube on flow velocity granules of fertilizers]. *Zbirnyk prats' NUBIP*, 2012. Retrieved from http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_7/12svm.pdf [in Ukrainian].
3. Deykun, V.A. (2013). Obgruntuvannya parametriv robochoho orhana dlya vnutrishn'ogruntovoho vnesennya mineral'nykh dobryv [Justification of the parameters of the working body for intrasoil insertion of mineral fertilizers]. *Dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.05.11.*, 190 [in Ukrainian].
4. Domrachev, V.A., Kem, A.A. & Mykhal'tsov, E.M. (2000). Issledovanie processa raspredeleniya semyan v podsoshnikovom prostranstve [Investigation of the process of seed distribution in the seedbed space]. *Informacionnye tekhnologii, informacionnye izmeritel'nye sistemy i pribory v issledovanii sel'skohozyajstvennykh processov*. CH. 1 sb. mater. region. nauch.-prakt. konf. «AHROINFO'2000». RASKHN. Syb. otd-nie. Novosibirsk, 2000. 338 [in Russian].
5. Kovbasa, V.P. & Deikun, V.A. (2008). Vyznachennya umov rozsiyuvannya chastynok mineral'nykh dobryv u pidlapovomu prostori [Determination of conditions for scattering of mineral fertilizer particles in the subclavian space]. *Ahroinzhenerni doslidzhennya*. L'viv: L'viv. nats. ahrar. un-t, 12 (2), 180-182 [in Ukrainian].
6. Deykun, V.A., Salo, V.M., Leshchenko, S.M. & Polyukhovych, A.V. (2018). Pat. 129713 U Ukraine, IPC A01B 49/06 (2006.01). Robochyy orhan dlya lokal'noho vnesennya mineral'nykh dobryv chy posivu. №u2018 04789; stated. May 02, 2018; has been published Nov 12, 2018, Bul. No. 21. [in Ukrainian].
7. Peretyat'ko, A.V., Ivzhenko, S.A. & Brezhnev, A.L. (2005). Teoreticheskoe obosnovanie geometricheskikh parametrov napravatelya-raspredelatelya semyan lapovogo soshnika [Theoretical substantiation of the

- geometric parameters of the seed guide-distributor paw coulter]. *Aktual'nye problemy sel'skohozyajstvennoj nauki i obrazovaniya*. Samara : FGOU VPO Samarskaya GSKHA, Vol. 3, 96-101 [in Russian].
8. Romanyshyn, O.YU. & Zayets', M.L. (2007). Soshnyk dlya pidhruntovo-rozkydnoho sposobu sivbi zernovykh kul'tur [Opener for subsoil-rocking method for grain crops]. *Zb. nauk. pr. KHTUSH im. Petra Vasylenka*, 9, 238-242 [in Ukrainian].
 9. Romanyuk, H.S. (1988). K obosnovanyu parametrov raspredelytel'no-vysevayushcheho ustroystva [To substantiate the parameters of the distributor-seeding device]. *Sovershenstvovanye rabochykh orhanov sel'skokhozyaystvennykh mashyn: Sb. n. tr. USKHA*, 48-53 [in Ukrainian].
 10. El'sgol'c, L. E. (1969). *Dyfferentsyal'nye uravneniya y varyatsyonnoye yschyslenye* [Differential equations and calculus of variations]. Moscow : Nauka [in Russian].

Viktor Deikun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Svitlana Deikun**, specialist

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Influence of Distributor Parameters on the Quality of Fertilizer Scattering in the Under-foot Space

The aim of the work is to substantiate the geometric parameters of the distributor, which are able to provide the maximum range of fertilizer particles in the subclavian space, based on the analysis of all factors affecting the material particles during their transportation to the surface of the distributor. The result of research is to achieve a uniform distribution of fertilizers on the width of the capture and, accordingly, on the area.

It is known that the particles of material sent in accordance with the given trajectories in the pre-provided areas of the surface of the furrow formed by the working body, in contact with the soil are significantly redistributed and the meaning of the traditional approach to uniformity is completely lost. In addition, it is necessary to take into account that for placing fertilizers in the soil, in most cases, flat-cutting working bodies are used. For normal operation, in terms of deepening into the ground, they must be installed with a forward tilt at an angle of up to 3°. As a result, the bottom of the furrow, which they form, acquires a conical shape with a slope to the center. In this case, it becomes obvious that the material must be fed not evenly across the width of the working body, and most of it to be directed at a clearly defined distance in the direction perpendicular to its axis. The numerical value of this distance is determined by the nature of the redistribution of the granules as a result of contact with the soil. In the process of rolling the granules or particles to the center, the uniformity of distribution will be restored. In this case, it becomes obvious that the material must be fed not evenly across the width of the working body, and most of it to be directed at a clearly defined distance in the direction perpendicular to its axis. The numerical value of this distance is determined by the nature of the redistribution of the granules as a result of contact with the soil. In the process of rolling the granules or particles to the center, the uniformity of distribution will be restored. In this regard, there is a need to solve the problem of ensuring the maximum range of particles in the transverse direction using the simplest geometry of the distributor surface. In our opinion, such a surface can be a prism.

In the article the results of theoretical research of process of portage and distributing of granules of mineral fertilizers are resulted after a reflection from the plane of reflection in sub paw space of trivial cutting of working organ. Geometrical parameters and corners of location of reflecting plane are grounded. The obtained dependences allow to reasonably establish geometrical parameters of the distributor which will provide the set range of flight of particles of material for working bodies of various width of capture and to reach desirable result taking into account laws of their redistribution at contact with soil.

speed of particle, distributor, distance of flight, surface of reflection

Одержано (Received) 03.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 14.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.20-27>

О.В. Нестеренко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук, **Д.Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук
Центальноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: nov_78@ukr.net

Дослідження режимних характеристик гравітаційної напрямної кривої живильного пристрою

Враховуючи взаємозв'язок між швидкістю введення зернового матеріалу до пневмосепараційного каналу (ПСК) та його питомим навантаженням є необхідним дослідження режимних характеристик пристроїв, які встановлюються безпосередньо перед введенням в ПСК. В статті висвітлені експериментальні дослідження руху зернового матеріалу по гравітаційній напрямній кривій живильного пристрою пневмосепаратора з метою визначення її раціональних параметрів при забезпеченні заданої швидкості введення зерна в канал. Отримані експериментальні залежності, які дозволяють обґрунтувати основні параметри напрямної поверхні живильного пристрою.

швидкість введення, гравітаційна напрямна крива, пневмосепаруючий канал (ПСК), зерновий матеріал, живильний пристрій, багаторівневе введення зерна

А.В. Нестеренко, доц., канд. техн. наук, **А.М. Васильковский**, проф., канд. техн. наук, **Д.И. Петренко**, доц., канд. техн. наук, **Д.Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет

Исследование режимных характеристик гравитационной направляющей кривой питательного устройства

Учитывая взаимосвязь между скоростью введения зернового материала в пневмосепарационный канал (ПСК) и его удельной нагрузкой, существует необходимость исследования режимных характеристик устройств, которые устанавливаются непосредственно перед вводом в ПСК. В статье освещены экспериментальные исследования движения зернового материала по гравитационной направляющей кривой питательного устройства пневмосепаратора с целью определения её рациональных параметров при обеспечении заданной скорости введения в канал. Получены экспериментальные зависимости, которые позволяют обосновать основные параметры направляющей поверхности питательного устройства для многоуровневого введения зерна.

скорость введения, гравитационная направляющая кривая, пневмосепарационный канал (ПСК), зерновой материал, питательное устройство, многоуровневое введение зерна

Постановка проблеми. Величина швидкості введення до пневмосепараційного каналу і питомого навантаження пневмосепаратора взаємопов'язані, і завжди потрібно раціонально підходити до питання їх вибору, оскільки при зменшенні швидкості введення, збільшується товщина зернового потоку, що негативно впливає на ефективність розділення зерна в зоні сепарації, але при цьому обмежується продуктивність сепаратора [1].

Натомість, при підвищенні питомого навантаження спостерігається зменшення повноти розділення, що пояснюється збільшенням товщини і опору шару зернового матеріалу [2, 3]. Це призводить до зростання кількості взаємодій компонентів зерноsumіші та негативно впливає на рівномірність поля швидкостей повітряного потоку, внаслідок чого погіршуються умови виділення легких домішок, які знаходяться в нижніх шарах зернового матеріалу [4, 5].

© О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, Д.І. Петренко, Д.Ю. Артеменко, 2020

Відповідно, товщина шару зернового матеріалу, що подається в пневмосепаруючий канал (ПСК), залежить не тільки від питомого навантаження, а також від його швидкості введення v_e і об'ємної ваги γ [3]. Якщо прийняти початкову швидкість і об'ємну вагу матеріалу постійними, то величина питомого навантаження буде повністю визначати товщину шару зернового матеріалу.

Тому, враховуючи це, є необхідним створення таких умов руху зернового матеріалу при яких загальна товщина шару зерна, що вводиться в ПСК, не буде впливати на умови виділення домішок та рівномірність поля швидкостей повітряного потоку.

Аналіз останніх досліджень і публікації. Дослідженню проблеми обґрунтування необхідної швидкості введення зернового матеріалу в ПСК присвячені роботи значної кількості дослідників, при цьому їх думки стосовно вибору оптимальної швидкості дещо розходяться. На основі досліджень [3] стверджується, що швидкість введення матеріалу повинна бути близька до мінімальної, а автор [2] вважає, що ефект очистки буде максимальний при швидкості введення $v_e = 0,3$ м/с. При цьому очевидно, що дослідження проводились в різних умовах.

Дослідженнями [6] пропонується збільшити швидкість введення, з використанням пристроїв, які покращують умови розділення зернового матеріалу під час руху в ПСК, при цьому наголошується, що введення в канал горизонтально збільшує розсіюваність траєкторій зернових часток [7]. Авторами встановлено, що для отримання максимальної ефективності розділення зернового матеріалу раціональне значення швидкості введення в ПСК знаходиться в межах 0,4...0,6 м/с [4, 6, 7, 8].

Більш ефективне вирішення задачі, спрямоване на зменшення товщини зернового потоку в зоні сепарації, досягається при використанні пневмосепараційних каналів з кільцеподібним та колоподібним перерізом, в яких введення зерна в канал здійснюється радіально від центру до периферії, або навпаки по всьому периметру каналу. При рівнозначній продуктивності такі канали мають значно менше питоме навантаження на одиницю ширини фронту зернового потоку, а також значно кращі умови для вирівнювання опору і швидкості повітряного потоку по поперечному перерізу [2, 3].

Для пневмосепаруючих каналів прямокутної форми, які є більш поширеними внаслідок зручного компонування з площинно-коливальними решітними сепараторами, необхідні конструктивні рішення, що дозволяють зменшити питоме навантаження на ПСК не збільшуючи при цьому швидкість введення зернового матеріалу.

В ПСК пневмосепаратора МПО-50 застосований гравітаційний живильник решітного типу завдяки якому важка фракція просипається крізь решето, тому крупні домішки вводяться над основним зерном [9].

Авторами [10] запропонований дворівневий гравітаційний живильник, лотки якого виконані ступінчасто, в шаховому порядку, тому зерновий матеріал, крім того, що розподілений на окремі потоки, потрапляє в ПСК на різній висоті і з різною швидкістю.

Нами запропоновано вирішення цієї проблеми шляхом застосування живильного пристрою для багаторівневого введення зерна в ПСК. Такий пристрій включає в себе гравітаційні напрямні криві, розташовані одна над одною і за допомогою яких відбувається розшарування загальної товщини зернового шару на декілька обмежених за продуктивністю зернових потоків, які надходять в різні по висоті робочі зони з однаковою швидкістю введення [11].

При використанні такого пристрою є необхідним проведення досліджень для визначення відповідних режимів його руху по напрямній гравітаційній кривій для забезпечення одношарового введення зернового матеріалу в ПСК.

Постановка завдання. Метою даних досліджень є визначення раціональних параметрів на прямої гравітаційної поверхні живильного пристрою з забезпеченням відповідних режимних характеристик зернового потоку при його багаторівневному введенні в ПСК.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи те, що при застосуванні живильного пристрою для багаторівневого введення зерна загальна товщина зернового потоку розділяється на кількість задіяних рівнів введення, основною умовою є забезпечення одношарової подачі зерна з такою швидкістю введення, при якій відбувається найінтенсивніше виділення легких домішок.

Забезпечення умови одношарового введення визначається параметрами на прямої поверхні живильника (кутом нахилу розгінної ділянки α , її довжиною L_p та радіусом дугоподібної ділянки r) (рис. 1). Відповідно, змінюючи вказані параметри, можна встановити величину питомого навантаження на рівень живильного пристрою q_{bi} , при якій буде забезпечено одношарову товщину зернового потоку.

Для виконання вище означених умов введення були проведені дослідження впливу параметрів на прямої поверхні живильника (кута нахилу розгінної ділянки α , її довжини L_p та радіуса дуги r) на швидкість введення v_e зернового матеріалу в ПСК.

Параметри розгінної ділянки змінювали в наступних межах: кут нахилу α , $\alpha_1 = 30^\circ$; $\alpha_2 = 33^\circ$; $\alpha_3 = 36^\circ$, довжину розгінної ділянки L_p – від 0,05 до 0,3 м з інтервалом в 0,05 м. Радіус дуги направляючої – $r_1 = 0,1$ м; $r_2 = 0,15$ м; $r_3 = 0,2$ м.

Швидкість введення визначали шляхом вимірювання реальних координат зернової частки в каналі [8], при цьому, не враховувався опір повітряному потоку.

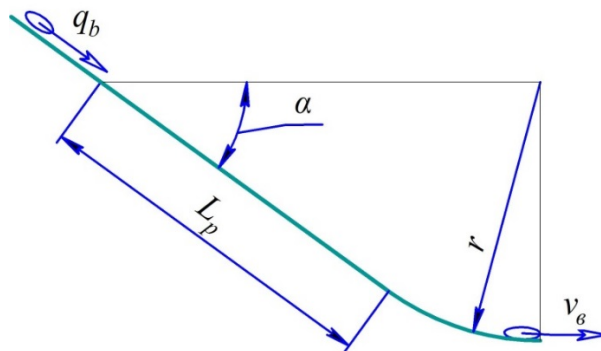


Рисунок 1 – Параметри на прямої поверхні живильного пристрою ПСК

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

При дослідженні одношарового руху зернового матеріалу регулювання початкової швидкості введення в канал здійснювали шляхом зміни довжини розгінної ділянки на прямої поверхні L_p та кута її нахилу α_e , при цьому, радіус дуги направляючої не змінювали ($r = 0,2$ м).

Величину питомого навантаження живильного пристрою q_B , кг/дм·год, визначали шляхом зважування маси зернового матеріалу G , яка проходила через одиницю ширини каналу B за проміжок часу t , завантажуючи бункер експериментальної установки навіскою масою $G=10$ кг. При дослідженні використовувався зерновий матеріал сорту «Вікторія», вологістю 14,6% та засміченістю 12%.

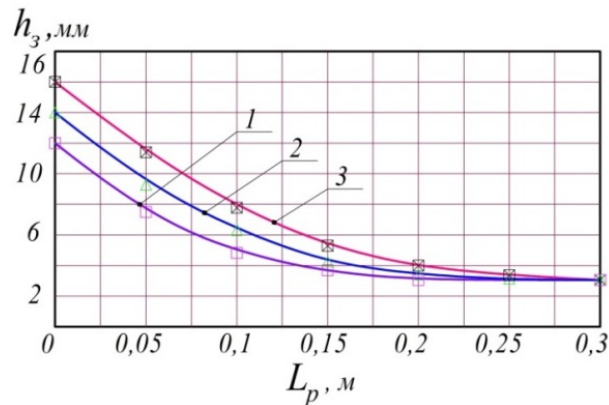
Повторюваність дослідів була п'ятикратною з допустимою похибкою $\pm 5\%$.

За результатами отриманих експериментальних залежностей (рис. 2.) можна стверджувати, що для питомих навантажень $q_B = 250 - 350$ кг/дм·год одношаровий рух матеріалу спостерігається при досягненні довжини розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м для всього діапазону досліджуваних кутів нахилу поверхні, а для навантажень $q_B = 500$

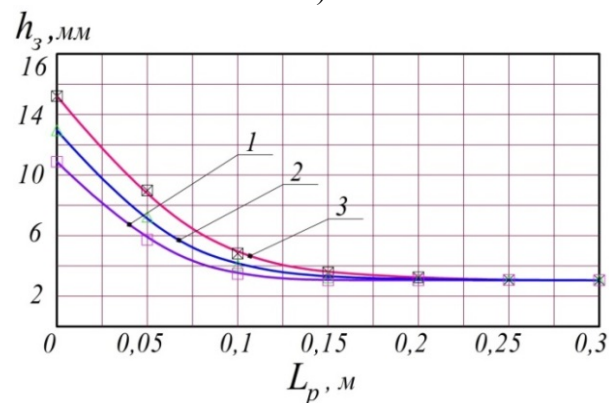
кг/дм·год, товщина шару в одне зерно забезпечується при $L_p = 0,25$ м для кутів нахилу $\alpha = 33 \dots 36^\circ$.

Враховуючи дослідження [12], можна сказати, що діапазон питомих навантажень при багаторівневному введенні буде варіювати в межах $q_B = 250 - 350$ кг/дм·год, при яких і спостерігається найвищий відсоток виділення легких домішок. Тому, для означених умов та завантаження ПСК до 2000 кг/дм·год, раціональною величиною є довжина розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м.

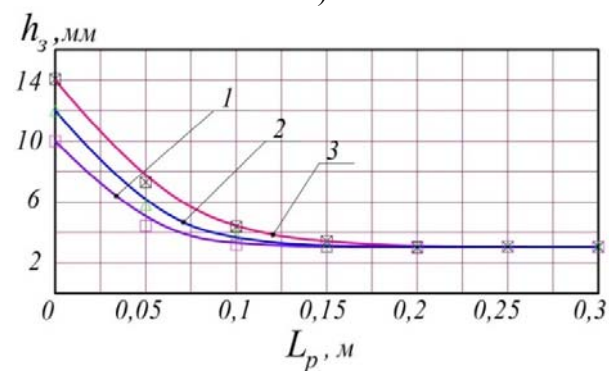
Наступним етапом досліджень було встановлення параметрів напрямної гравітаційної кривої для забезпечення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК в межах $v_e = 0,4 \dots 0,6$ м/с.



а)



б)



в)

Рисунок 2. Залежність зміни товщини шару зернового потоку h_z по довжині розгінної ділянки напрямної кривої живильного пристрою ПСК, L_p при: 1 – $q_B = 250$ кг/дм·год; 2 – $q_B = 350$ кг/дм·год; 3 – $q_B = 500$ кг/дм·год; а) – $\alpha = 30^\circ$; б) – $\alpha = 33^\circ$; в) – $\alpha = 36^\circ$.

Джерело: розроблено авторами

В результаті отримані графічні залежності (рис. 3) з фіксованою довжиною розгінної ділянки $L_p = 0,2$ м, при якій забезпечується одношаровий рух зернового матеріалу для питомих навантажень $q_B = 250 \dots 350$ кг/дм·год.

На основі отриманих залежностей (рис. 3) можна зробити висновок, що збільшення кута нахилу α призводить до підвищення швидкості руху матеріалу, при цьому, при потраплянні зернового матеріалу на дугоподібну ділянку, швидкість стрімко спадає. При чому, чим більший радіус, тим більше зменшується швидкість введення.

Це явище можна пояснити тим, що при потраплянні на дугоподібну ділянку на зерновий матеріал починає діяти відцентрова сила інерції, що призводить до зростання сили тертя, і, відповідно, до зменшення лінійної швидкості руху.

Так, можна спостерігати, що після сходу з розгінної ділянки, при куті її нахилу $\alpha = 33^\circ$, швидкість зернового матеріалу зменшується від 0,76 м/с до 0,55...0,62 м/с в залежності від радіусу r дугоподібної ділянки гравітаційної напрямної кривої.

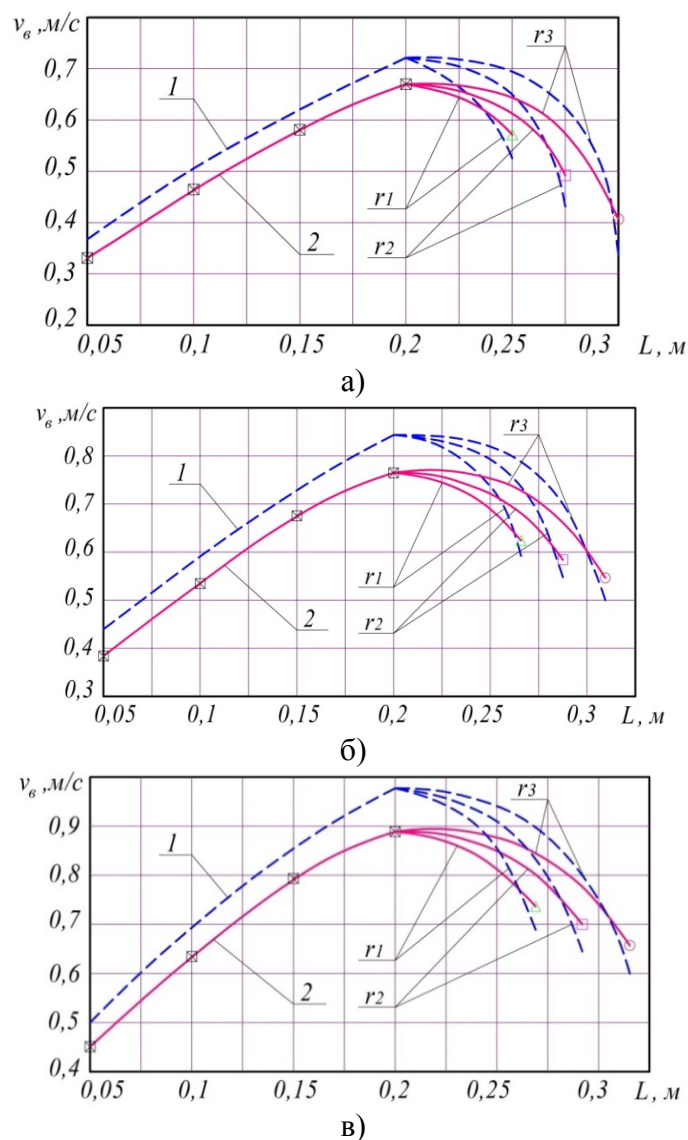


Рисунок 3 – Зміна швидкості руху зернового матеріалу по напрямній гравітаційній кривій живильного пристрою ПСК. 1 – теоретична залежність [13]. 2 – експериментальна залежність при: $q_B = 250$ кг/дм·год; $r_1 = 0,1$ м; $r_2 = 0,15$ м; $r_3 = 0,2$ м. Кут нахилу розгінної ділянки:

а) – $\alpha = 30^\circ$; б) – $\alpha = 33^\circ$; в) – $\alpha = 36^\circ$

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

З отриманих експериментальних залежностей (рис. 3) видно, що під час руху по прямолінійній розгінній ділянці швидкість зернового матеріалу зростає по параболічному закону, і чим більший кут нахилу α та довжина розгінної ділянки L_p , тим динамічніше відбувається збільшення швидкості.

Так, при куті нахилу $\alpha = 33^\circ$ та $L_p = 0,2$ м швидкість в кінці розгінної ділянки v_l досягає 0,87 м/с, а при введенні в ПСК $v_e = 0,55$ м/с.

Збільшення радіусу дуги напрямної кривої призводить до зменшення швидкості введення зернового матеріалу в ПСК v_e . З одного боку збільшення радіусу сприяє зменшенню величини сили інерції, що призводить до зменшення сили тертя, але при цьому збільшується час руху частинки, тому величина швидкості введення матеріалу в ПСК v_e зменшується.

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

Розбіжність між теоретичними і експериментальними залежностями пояснюється тим, що при теоретичних дослідженнях знехтувано аеродинамічним опором часток, а також не враховано внутрішній коефіцієнт тертя між зерновими шарами.

Також необхідно відмітити, що при введенні зернового матеріалу по дузі спостерігається значно ширший діапазон розсіювання часток, ніж при введенні по прямолінійній ділянці. Тому, безпосередньо перед потрапляння матеріалу в ПСК доцільно встановлювати дугоподібну ділянку.

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено параметри гравітаційної напрямної поверхні при яких досягається одношаровий режим руху зернового матеріалу для діапазону питомих навантажень $q_B = 250 - 500$ кг/год.

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

Список літератури

1. Підвищення ефективності роботи пневмосепаруючих каналів зерноочисних машин / Васильковський М.І. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* 2004. Вип. 34. С.84-88.
2. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.
3. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов / Под ред. З.Л. Тица. М.: Машиностроение, 1967. 447 с.
4. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов: дисс. ... доктора техн. наук: 05.20.01. Барнаул, 1985. 498 с.
5. Матвеев А.С. Изучение процесса взвешивания и сепарирования зернистого материала вертикально-восходящим воздушным потоком. *Труды ВИМ.* Т.37. М.: 1965. С. 231-241.
6. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарации на зернообработывающих предприятиях. М.: Колос. 1980. С. 103-140.
7. Бабченко В.Д., Корн А.М., Матвеев А.С. Высокопроизводительные машины для очистки зерна. М.: ВНИИТЭИСХ, 1982. 50 с.

8. Сабірзянов Т.Г., Васильковський М.І. Нестеренко О.В. До методики визначення швидкості введення зерна в пневмосепараційний канал. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту.* Кіровоград : КНТУ, 2008. Вип. 21. С. 263-267.
9. Машина предварительной очистки МПО-50С. Каталог продукции ОАО Головное специализированное конструкторское бюро (ГСКБ) «ЗЕРНООЧИСТКА».
10. Пат. 2223829 Рос. Федерация, МПК7 B07B 11/06, B07B 4/02. Пневматический сепаратор / Саитов В.Е., Бурков А.И., Гатауллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Вятская гос. с.-х. академия. - № 2002108084/03; заявл. 29.03.02; опубл. 20.02.04, Бюл. № 5. 5 с.
11. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / Нестеренко О.В. та ін. *Зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* Кіровоград : КНТУ, 2012. Вип. 25. Ч.1. С.49-53.
12. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Петренко Д.І. Дослідження якісних показників пневмосепарації при багаторівневому введенні зерна. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст.* Ред.-вид. відділ ЛНТУ. Луцьк, 2015. Вип. 32. С. 143–151.
13. Нестеренко О.В., Сисоліна І.П., Яценко В.Е. Обґрунтування параметрів прямої гравітаційної кривої живильного пристрою пневмосепаратора. *Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції: зб. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. Кропивницький : ЦНТУ. 2018. С. 54–55.*

Referencis

1. Vasylovskiy, M.I., Vasylovskiy, O.M., Moroz, S.M., Kosinov, M.M. & Nesterenko, O.V. (2004). Improving the efficiency of pneumatic separation channels of grain cleaning machines. *Design, production and operation of agricultural machines. National interdepartmental scientific and technical collection. Issue 34*, 84-88 [in Ukrainian].
2. Malis, A.Ya. & Demidov, A.R. (1962). *Mashiny dlja ochistki zerna vozdushnym potokom* [Machines for cleaning grain by air flow. Moscow: Mashgiz [in Russian].
3. Tits, Z.L. (Eds.). (1967). *Machines for post-harvest seed processing. Theory and calculation of machines, technology and automation processes.* Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
4. Zlochevskiy, V.L. (1985). Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials. Doctor's thesis. Barnaul [in Russian].
5. Matveev, A.S. (1965). Study of the process of weighing and separation of granular material by a vertically ascending air flow. *Proceedings of VIM, Vol. 37*, 231-241. [in Russian].
6. Gortinskiy, V.V., Demskiy, A.B. & Boriskin, M.A. (1980). *Separation processes at grain processing enterprises.* Moscow: Colos [in Russian].
7. Babchenko, V.D. Korn, A.M., & Matveev, A.S. (1982). *High-performance grain cleaning machines.* Moscow: VNIITEISH [in Russian].
8. Sabirzyanov, T.G., Vasylovskiy, M.I. & Nesterenko, O.V (2008). To the methodology of identifying the feeding velocity of grain into the pneumo-separation channel. *Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation: Coll. of Scien. Works, Vol. 21*, 263-267 [in Ukrainian].
9. Machine of preliminary cleaning MPO-50C. Product catalog of JSC Main Specialized Design Bureau (MSDB) "ZERNOOCHISTKA". [in Russian].
10. Patent 2223829 Russian Federation, МПК7 B07B 11/06, B07B 4/02. Pneumatic separator / Saitov V.E., Burkov A.I., Gataullin R.G.; applicant and patent holder is Vyatka state. agricultural academy. № 2002108084/03; declared 29.03.02; publ. 20.02.04, Bull. № 5. 5 p. [in Russian].
11. Nesterenko, O.V., Vasylovskiy, O.M., Leshchenko, S.M., Petrenko, D.I. & Bogatyrev D.V. (2012). Perspective direction of intensification of air grain separation . *Engineering in agricultural production, industry engineering, automation: Coll. of Scien. Works of Kirovohrad National Technical University, Issue. 25, Part 1*, 49-53 [in Ukrainian].
12. Nesterenko, O.V., Leshchenko, S.M. & Petrenko, D.I. (2015). Research of qualitative indicators of pneumoseparation at multilevel grain feeding. *Agricultural machinery: collection. Of Scien. Works: publishing department of LNTU, Issue 32*, 143–151 [in Ukrainian].
13. Nesterenko, O.V., Sysolina, I.P. & Yatsenko, V.E. (2018). Substantiation of parameters of guide gravitational curve of the feeding unit of a pneumatic separator. *Achievements and prospects of production, processing and storage of agricultural products : Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical conference.* (pp. 54–55). Kropyvnytskyi: CUNTU [in Ukrainian].

Olexandr Nesterenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexiy Vasylykovskyi**, Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of Performance Characteristics of the Gravitational Guide Curve of Feeder Unit

The rate of the feed velocity and specific load in the air separator are interrelated and require a rational approach to their choice, because reducing the rate of velocity increases grain flow thickness, which adversely affects the efficiency of grain separation in the separation zone, but limits separator performance.

Based on the research of many authors, it was concluded that the feed velocity of grain material into the pneumatic separation channel should be in the range of 0.4... 0.6 m/s.

Taking into account that using a feeder unit for multilevel grain input, the total thickness of grain flow is divided by the number of the involved levels of input. The main condition is to ensure a single layer of grain feed at the velocity at which the most intense release of light impurities.

Therefore, the purpose of the study is to identify rational parameters of the guide gravitational surface of the feeder unit with the provision of appropriate performance characteristics of the grain flow during its multilevel feeding into the pneumatic separating channel.

As a result of experimental research, the dependences of the modes of movement of grain material on the gravitational guide curve on its main parameters, namely, the length of the acceleration section L_p , its angle α and the radius of the arcuate section r . On the basis of the carried-out research parameters of a gravitational guide surface at which a single-layer mode of movement of grain material for a range of specific loadings is reached are established $q_B = 250 - 500$ kg/hour.

Accordingly, for the conditions of movement of grain material with a thickness of one grain with the velocity of feeding into the pneumatic separation channel $v_g = 0.5...0.6$ m/s, the rational parameters of the guide gravity curve for cereals with the internal friction coefficient $\varphi_{mer} = 0.47...0.73$ there are: the length of the acceleration section $L_p = 0.2$ m, the angle of its inclination $\alpha = 33^\circ$ and the radius of the arcuate section $r = 0.15$ m.

input velocity, gravitational guide curve, pneumatic separation channel (PSC), grain material, feeder unit, multilevel grain input

Одержано (Received) 30.11.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>

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

Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: aliev@meta.ua

К. О. Лупко, асп.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, e-mail: kristinal97@ukr.net

Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур

Актуальність роботи полягає в дослідженні закономірностей впливу фізико-механічних властивостей насіння дрібнонасінних культур на їх подальшу очистку та сепарацію. Досліджено вплив вологості насіння на їх фізико-механічні властивості. Встановлено, що щільність насіння зростає з підвищенням вологості, що призводить до збільшення кута природнього ухилу насіння. В результаті досліджень аеродинаміки насіння отримані залежності швидкостей витання від геометричних параметрів насіння, з яких встановлено що із збільшення геометричних розмірів насіння швидкість їх витання збільшується лінійно для кожної дрібнонасінної культури.

дрібнонасінні культури, насіння, очищення, сепарація

© Е. Б. Алієв, К. О. Лупко, 2020

Э.Б. Алиев, ст. исслед., д-р техн. наук

Институт масличных культур Национальной академии аграрных наук Украины, г. Запорожье, Украина

К.О. Лупко, асп.

Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, г. Днепр, Украина

Морфологические признаки и физико-механические свойства семян мелкосеменных культур

Актуальность работы заключается в исследовании закономерностей влияния физико-механических свойств семян мелкосеменных культур на их дальнейшую очистку и сепарацию. Исследовано влияние влажности семян на их физико-механические свойства. Установлено, что плотность семян возрастает с повышением влажности, что приводит к увеличению угла естественного уклона семян. В результате исследований аэродинамики семена получены зависимости скоростей витания от геометрических параметров семян. Установлено, что с увеличением геометрических размеров семян скорость их витания увеличивается линейно для каждой мелкосеменной культуры.

мелкосеменные культуры, семена, очистка, сепарация

Постановка проблеми. Для створення бази даних і проведення систематизації насіння зразків дрібнонасінневих культур необхідно визначити закономірності впливу морфологічних показників на їхні фізико-механічні властивості. Розробка новітніх технологій та технічних пристроїв для проведення очищення та розділення можлива завдяки розумінню характерних морфологічних показників для кожної із дрібнонасіннєвих культур.

При проведенні післязбиральної обробки насіння необхідно враховувати його фізико-механічні властивості. Цей показник є одним з найважливіших, оскільки майже все насіння піддається механічному впливу – руйнуванню, перемішуванню, транспортуванню тощо. Без знання властивостей оброблювального матеріалу неможливо спроектувати та розрахувати обладнання для проведення технологічних операцій. Для формування моделей та емпіричних математичних залежностей необхідно знати значення маси 1000 насінин, щільності, коефіцієнту тертя, кута природнього відкосу. Ці показники зможуть дозволити встановити оптимальні і раціональні параметри робочих органів, які застосовуються в технологічних процесах очистки та сепарації насіннєвого матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначенню властивостей дрібнонасінневих культур присвячені роботи багатьох дослідників [1–5]. Відомі фізико-механічні та технологічні властивості дають розуміння властивостей (рис. 1), які слід використовувати при розробці моделей процесу сушіння та післязбиральної обробки насіння.

Для видового визначення насіння використовуються зовнішні морфологічні ознаки. Одні з них (контур, форма, поверхня) є стійкими, інші (забарвлення, розміри) можуть змінюватися. При визначенні основних характеристик насіння приймається наступна послідовність основних морфологічних ознак.

Контур насіння (плода) дає перше представлення про його форму і є найбільш стійкою характерною ознакою. Контур може бути округлим, яйцеподібним, овальним, ниркоподібним, серцеподібним, трикутним, прямокутним, веретеновидним, булавовидним і т.п. Цей показник визначається двома вимірами – довжиною і шириною. Залежно від того, з якого боку його розглядати, насіння може мати кілька різних контурів. Тому характеристику контуру насіння дають в проекції з широкої сторони насіння на площині. В інших випадках, робиться застереження, що контур описується із сторони спинки, черевця або збоку.



Рисунок 1 – Морфологічні та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур
Джерело: розроблено авторами з використанням [4]

Форма визначається трьома вимірами – довжиною, шириною і товщиною. Довжиною в ботанічному визначенні вважається відстань від основи насіння до його вершини; шириною – відстань між бічними сторонами, тобто вимір ширини буде перпендикулярно до довжини. У звичайному понятті довжина – найбільший, ширина – середній, товщина – найменший розмір.

Поверхня, або зовнішня структура насінневих оболонок надзвичайно різноманітна. Основні структурні ознаки поверхні насіння є стійкими. Вони часто доповнюються опушенням, блиском, матовістю, восковим нальотом, які в процесі зберігання і очищення насіння можуть втрачатися.

Насіння різняться між собою за кольором і за характером забарвлення. Кольори, в які забарвлене насіння, різноманітні – від білого до чорного з усіма перехідними тонами і відтінками. Типовим вважається забарвлення зрілих насінин. Воно може бути одноколірним, строкатим, плямистим, крапчастим, мармуровим тощо. Характер забарвлення – від слабкого до інтенсивного.

За величиною насіння (за ознакою довжини) розподіляється на наступні групи: дуже дрібне – не більше 1 мм; дрібне – від 1 до 2 мм; середнє – від 2 до 4 мм; велике – від 4 до 8 мм та дуже велике – понад 8 мм.

Величина насіння, навіть у одного певного виду – непостійний показник. Середній розмір не дає уявлення про можливі відхилення в ту або ж іншу сторону. Більш постійною величиною вважається і відношення між довжиною, шириною і товщиною насіння. При описі насіння вказують його верхню і нижню межі. Однак і це співвідношення може змінюватися в залежності від ступеня розвитку і дозрівання насіння.

Представлені вище показники використовуються для опису насіння рослини з біологічної точки зору і є сільськогосподарськими ознаками. Однак, для очищення і сепарації насіння, необхідно досліджувати їх фізико-механічні властивості, які впливають на ефективність виконання зазначених процесів.

Постановка завдання. З метою підвищення ефективності процесів очищення та сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінних культур (гірчиця, льон, ріжій, ріпак) пропонується дослідження їх фізико-механічних властивостей.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було розроблено план експериментальних досліджень, що передбачив визначення фізико-механічних показників насіння дрібнонасінних культур, а саме:

- показників, які характеризують сипкість насіння (кут природного ухилу φ);
- фрикційних властивостей насіння (статичний коефіцієнт тертя f);
- пористості (шпаруватості) ε та щільності ρ ;
- розмірно-масових характеристик насіння (довжина L , ширина B , товщина T , ефективний діаметр D_e , маса 1000 насінин M_{1000}).

На основі отриманих експериментальних даних було виконано аналіз впливу вологості насіння W_b на досліджувані показники. Для надання насінню дрібнонасінних культур певного показника вологості додавали розраховану кількість води, перемішували, потім отримана суміш герметизувалася в поліетиленових мішках. Після цього зразки витримувалися при 50°C у теплоізоляційній шафі протягом одного тижня. Перед випробуванням необхідну кількість зразків витягували з теплоізоляційної шафи для набуття ними кімнатної температури. Всі фізико-механічні властивості були визначені при вмісті води, рівному $7,0 \pm 0,2 \%$, $10,0 \pm 0,2 \%$, $13,0 \pm 0,2 \%$ і $16,0 \pm 0,2 \%$. Повторність кожного вимірювання складало 5 разів. Розмірні характеристики випадково обраних 100 насінин визначалися за довжиною, шириною і товщиною кожного насіння. Для дослідження розмірних характеристик використовувався мікрометр з точністю до 0,01 мм. Ефективний діаметр, виражений як розмір, розраховувався з використанням наступного рівняння [6, 7, 8]:

$$D_p = 2 \sqrt[3]{\frac{3 V_{100}}{4 \cdot 100}} \quad (1)$$

де V_{100} – дійсний об'єм 100 насінин. Даний показник був визначений методом витіснення гліцерином [6], мм^3 .

Масу 1000 насінин визначали методом випадкового відбору 100 зразків і зважували за допомогою електронних ваг із точністю до 0,001 г.

Дійсна щільність (ρ_t) визначалася методом витіснення толуолу [6]. Об'ємну щільність (ρ_b) насіння визначали шляхом заповнення циліндра відомого об'єму ($100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$) і зважування на електронних вагах.

Пористість розраховували за такою формулою [9, 10, 11]:

$$\varepsilon = 100 \frac{(\rho_t - \rho_b)}{\rho_t} \quad (2)$$

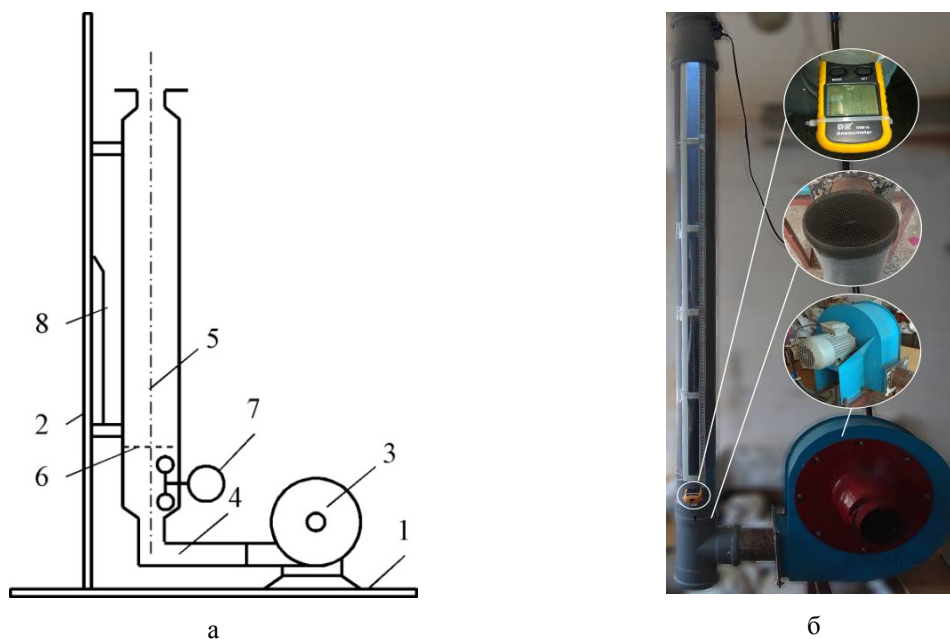
Кут природного ухилу визначався, як арктангенс відношення подвійної висоти до діаметра купи насіння, яка розміщена на круглій пластині [12, 13]. Насіння насипали з висоти 200 мм на круглу пластину діаметром 200 мм.

Статичний коефіцієнт тертя f визначався для сталі. Для цього вимірювання один кінець поверхні тертя був прикріплений до гвинта. Насіння поміщали на поверхню тертя, один кінець якої поступово піднімався за допомогою гвинта. Тангенс кута, при якому насіння починало ковзати по поверхні і визначало статичний коефіцієнт тертя [14].

Геометричні параметри і фізико-механічні властивості визначають аеродинаміку насіння в повітряному потоці. При русі повітря через шари насіння (в процесі технологічної обробки – очищення, теплової сушки, активного вентилявання і ін.) поведінка насіння визначається швидкістю руху повітря. При невеликих швидкостях

насіння зберігає властивості шару, а повітря проходить через пори шару. Збільшення швидкості руху повітря призводить до того, що насінини, залишаючись в шарі, починають переміщатися одне відносно іншого. Концентрація насінин в шарі різко зменшується, а об'єм шару зростає. Виникає псевдозрідження, потім псевдокипіння, коли опір повітряного потоку стає близьким за величиною до ваги насінин. Швидкість потоку газу або повітря, при якій частинки сипучого середовища знаходяться в підвішеному стані і є швидкістю витання для даного матеріалу. На випробувальному стенді були виміряні швидкості витання насіння соняшнику.

Схема стенду для визначення швидкості витання насіння представлена на рис. 2.



1 – станина; 2 – стійка; 3 – повітрорудна машина; 4 – фітинг; 5 – труба; 6 – сітка;
7 – анемометр GM816; 8 – шкала

Рисунок 2 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) стенду для визначення швидкості витання часток
Джерело: розроблено авторами

На станині 1 жорстко встановлена вертикальна стійка 2 і повітрорудна машина 3 з регульованою заслінкою. Фітинг 4 з'єднує повітрорудну машину і вертикальну трубу 5, в нижній частині якої встановлена сітка 6. Швидкість повітря вимірюється анемометром GM816 7, висота підйому частинок – шкалою 8. На сітці вертикальної труби містився шар насіння товщиною 3-5 мм. Після включення електродвигуна повітрорудної машини, частота обертання ротора плавно підвищувалася. Швидкість витання визначалася за висотою підйому частинок. Коли приблизно 95 % частинок шару піднімалися в просторі труби, зчитуються показання анемометра. Досліджувалися різні фракції попередньо розділеного за розмірами матеріалу.

Об'єктами дослідження були обрані зразки насіння дрібнонасінневих культур селекції Інституту олійних культур НААН (м. Запоріжжя): гірчиця Тавричанка, рижій Престиж, ріпак Легіон, льон Світлозір.

В результаті проведених досліджень було отримано залежності впливу вологості насіння W_b на ефективний діаметр D_e , масу 1000 насінин M_{1000} , пористість ϵ , дійсну щільність ρ_t , кут природнього відкосу ϕ , коефіцієнт тертя f , графічна інтерпретація яких представлена на рис. 3.

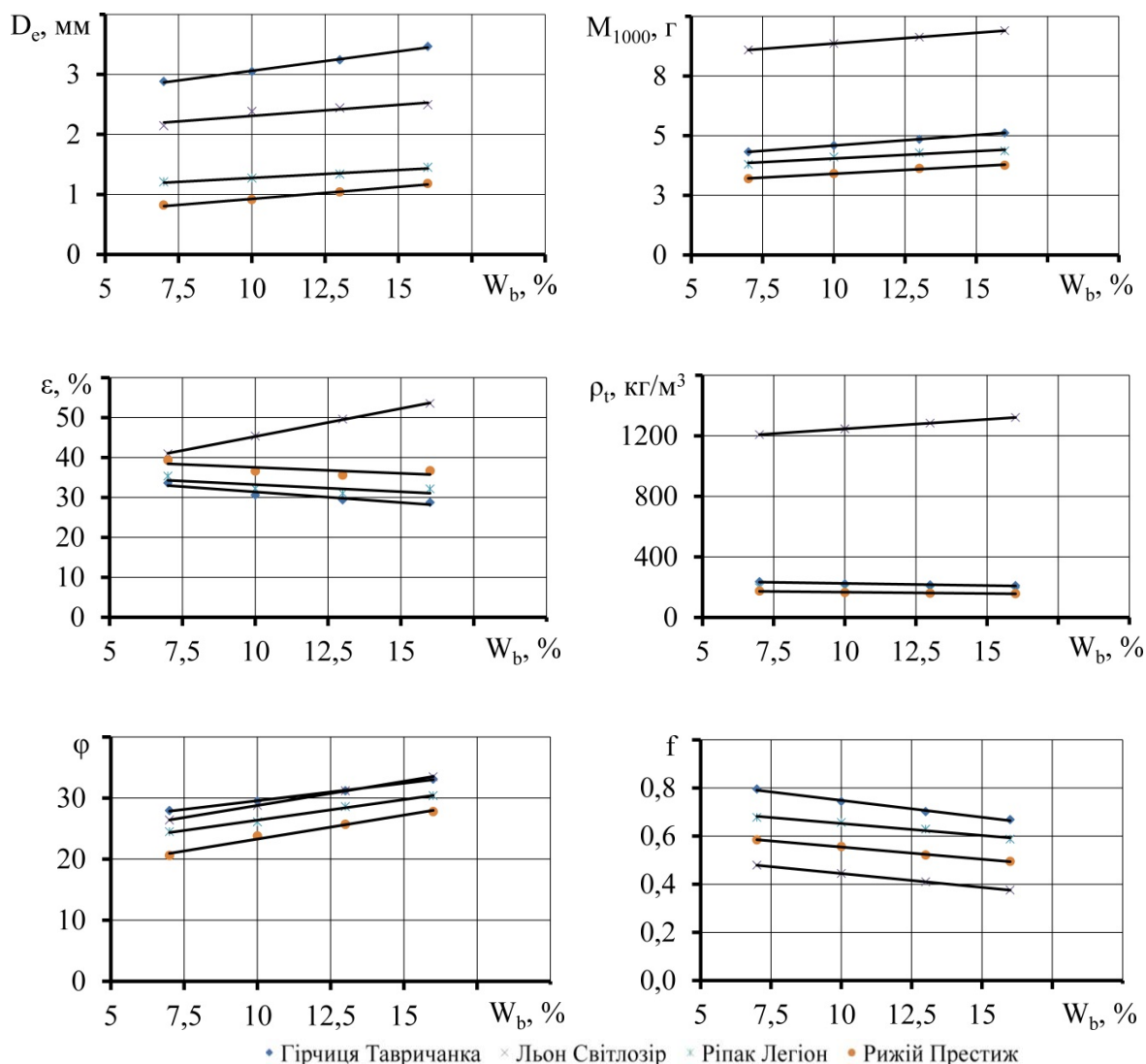


Рисунок 3 – Залежність впливу вологості насіння W_b на ефективний діаметр D_e , масу 1000 насінин M_{1000} , пористість ε , дійсну щільність ρ , кут природного ухилу φ , коефіцієнт тертя f
 Джерело: розроблено авторами

Аеродинамічні властивості насіння в повітряному потоці досліджували для різних фракцій матеріалу, що був попередньо розділений за розмірами. На рис. 4 представлені лінії тренду, які з максимальною точністю (коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0,94-0,97$) описують експериментальні залежності швидкостей витання від геометричних параметрів насіння. З графіків видно, що при збільшенні геометричних розмірів досліджуваного насіння лінійно зростає швидкість їх витання для кожної культури.

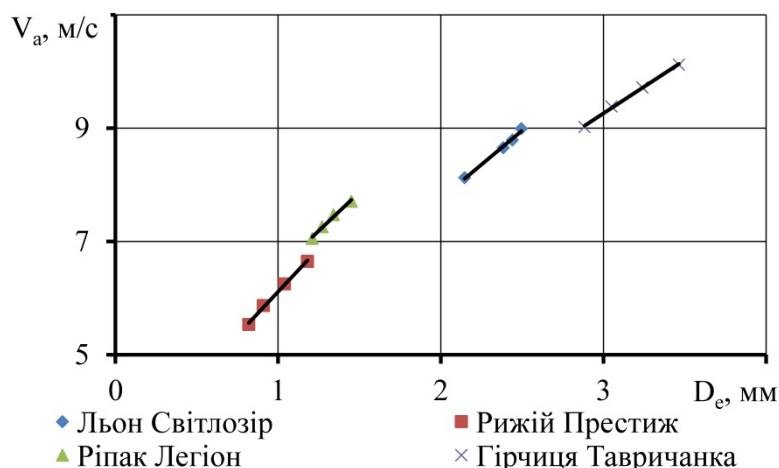


Рисунок 4 – Залежність швидкості витання насіння дрібнонасінних від геометричних параметрів олійних культур

Джерело: розроблено авторами

Провівши аналіз отриманих даних та побудованих на їх основі графіків, можна зробити висновки та оцінити вплив вологості насіння на досліджувані показники.

На фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур величезний вплив має його вологість. Криві отриманих значень показують, що з підвищенням вологості показники досліджуваного матеріалу збільшуються. Це пояснюється тим, що при підвищенні вологості форма насінини майже перетворюється на кулясту, а це, в свою чергу, призводить до збільшення кривизни поверхні і зменшення точок контакту між насінинами. В результаті цього зростає кут природного ухилу.

Коефіцієнт тертя насіння дрібнонасінних культур залежить від шорсткості поверхні тертя і при зростанні вологості зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні вологості зменшуються сили молекулярного притягання оболонки насінини до поверхні матеріалу.

Зростання вологості насіння – суб'єктивний визначальний фактор його щільності. Щільність насіння зростає з підвищенням вологості. З цього можна зробити висновок, що при поглинанні досліджуваним матеріалом вологи збільшується сумарна вага насінини, і як результат – збільшується її питома вага.

З результатів досліджень розмірно-масових характеристик насіння дрібнонасінних культур зрозуміло, що розміри основної маси насіння не суттєво відрізняється від середніх розмірів, проте простежується вплив вологості на досліджувані показники.

В результаті досліджень встановлено особливість зміни кута нахилу прямої лінії тренда залежності швидкості витання від геометричних параметрів насіння дрібнонасінних культур, що пояснюється, перш за все, їх формою.

Висновки. Узагальнюючи результати дослідження, слід зазначити, що вихідні розмірні показники насіння можна усереднити під час проектування та розрахунку машин для очистки та сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінних культур. Завдяки проведеним дослідженням із встановлення фізико-механічних показників насіння дрібнонасінних культур можна отримати вихідні дані для моделювання процесу їх очищення та сепарації, вибору оптимальних параметрів машин для забезпечення зазначених процесів.

Список літератури

1. Белобородов, В.В. (1966). Основные процессы производства растительных масел: Монография. Пищевая промышленность. 478 с.
2. Копейковский, В.М. (1982). Технология производства растительных масел. Монография: Легкая и пищевая промышленность. 416 с.
3. Пешук, Л.В., Носенко Т.Т. (2011). Біохімія та технологія олієжирової сировини. Навчальний посібник. Центр учбової літератури. 296 с.
4. Руднев, С.Д. (2004). Фізико-механічні властивості сировини і продукції. Навчальний посібник. Кемеровський технологічний інститут харчової промисловості. Кемерово. 117 с.
5. Буянов, А.И., Воронюк, Б.А. (1970). Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений (Методы испытаний, приборы, характеристики). Монография: Колос, 1970, 424 с.
6. Mohsenin, N.N. (1980). Physical properties of plant and animal materials. *New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc.* P. 51-87.
7. Aydin, C. (2003). Physical properties of almond nut and kernel. *New Food Eng.* Vol. 60. P. 315-320.
8. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. (1986). Unit operations of chemical engineering. *McGraw-Hill Book Co*, New York.
9. Jain, R.K. (1997). Properties of pear millet: *Journal of Agricultural Engineering Research*. P. 85-91.
10. Sahay, K.M. (1994). Unit operations in agricultural processing: *Vikas Publishing House Pvt Ltd*, New Delhi.
11. Singh, K.K. (1996). Physical properties of sunflower seeds : *J. Agric. Eng.* Vol. 64. P. 93-98.
12. Joshi, D.C. (1993). Physical properties of pumpkin seed: *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 5. P. 219-229.
13. Ogunjimi, L. (2002). Some engineering properties of locust bean: *J. Food En.* Vol. 55, P. 95-99.
14. Nimkar, M.P. (2001). Some Physical properties of green gram: *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 80 (2). P. 183-189.

Referencis

1. Beloborodov, V.V. (1966) *Osnovnyye protsessy proizvodstva rastitel'nykh masel. Pishchevaya promyshlennost'* [Main processes of vegetable oils production] [in Russian].
2. Kopeykovskiy, V.M. (1982) *Tekhnologiya proizvodstva rastitel'nykh masel. Monografiya* [Vegetable oil production technology. Monograph]. Legkaya i pishchevaya promyshlennost' [in Russian].
3. Peshuk, L.V., Nosenko, T.T. (2011). *Biokhimiya ta tekhnolohiya oliyezhyrovoyi syrovyny*. [Biochemistry and technology of oil and fat raw materials]. Tsentr uchbovoyi literatury. [in Ukrainian].
4. Rudnyev, S.D. (2004). *Fiziko-mekhanichni vlastyvosti syrovyny i produktsiyi*. [Physico-mechanical properties of raw materials and products]. Kemerovs'kyi tekhnolohichnyi instytut kharchovoyi promyslovosti. Kemerovo [in Ukrainian].
5. Buyanov, A.I., Voronyuk, B. A. (1970). *Fiziko-mekhanicheskiye svoystva rasteniy, gruntov i udobreniy (Metody ispytaniy, pribory, kharakteristiki)*. [Physical and mechanical properties of plants, soils and fertilizers (Test methods, devices, characteristics)]. Kolos [in Russian].
6. Mohsenin, N.N. (1980). Physical properties of plant and animal materials. *New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc* [in English].
7. Aydin, C. (2003). Physical properties of almond nut and kernel. *New Food Eng, Vol. 60*, 315-320 [in English].
8. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. (1986). Unit operations of chemical engineering. *McGraw-Hill Book Co*, New York [in English].
9. Jain, R.K. (1997). Properties of pear millet: *Journal of Agricultural Engineering Research*, 85-91. [in English].
10. Sahay, K.M. (1994). Unit operations in agricultural processing: *Vikas Publishing House Pvt Ltd*, New Delhi. [in English].
11. Singh, K.K. (1996). Physical properties of sunflower seeds : *J. Agric. Eng, Vol. 64*, 93-98. [in English].
12. Joshi, D.C. (1993). Physical properties of pumpkin seed: *Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 5*, 219-229 [in English].
13. Ogunjimi, L. (2002). Some engineering properties of locust bean: *J. Food En, Vol. 55*, 95-99 [in English].
14. Nimkar, M.P. (2001). Some Physical properties of green gram: *Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 80 (2)*, 183-18 [in English].

Elchyn Aliiev, Senior Researcher, DSc.

Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Zaporizhia, Ukraine

Christina Lupko, post-graduate

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Morphological Characteristics and Physical & Mechanical Properties of seeds of small-seeded crops

To create a database and systematize the seeds of samples of small-seeded crops, it is necessary to determine the patterns of influence of morphological parameters on their physical and mechanical properties. The development of the latest technologies and technical devices for cleaning and separation is possible due to the understanding of the characteristic morphological parameters for each of the small-seeded crops.

The aim of the research is to determine the physical and mechanical properties of the seed material of small-seeded crops (mustard, flax, ryegrass, rapeseed), necessary to increase the efficiency of their cleaning and separation processes. To achieve this goal, a plan of experimental research was developed, which provided for the determination of physical and mechanical parameters of seeds of small-seeded crops, namely: indicators that characterize the flowability of seeds (angle of natural bias); frictional properties of seeds (static coefficient of friction); porosity (density) and density; size and mass characteristics of seeds (length, width, thickness, effective diameter, weight of 1000 seeds).

It is established that the physical and mechanical properties of seeds of small-seeded crops are greatly influenced by its humidity. With increasing humidity, the performance of the test material increases. This is due to the fact that with increasing humidity, the shape of the seed almost turns into a spherical, which, in turn, leads to an increase in the curvature of the surface and reduce the points of contact between the seeds. As a result, the angle of natural inclination increases. The coefficient of friction of seeds of small-seeded crops depends on the roughness of the friction surface and decreases with increasing humidity. This is due to the fact that with increasing humidity decreases the forces of molecular attraction of the seed coat to the surface of the material. Seed density increases with increasing humidity. From this we can conclude that the absorption of moisture by the investigated material increases the total weight of the seed, and as a result - increases its specific weight.

small-seeded crops, seeds, cleaning, separation

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.674.6:631.559

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.35-41>

К.В. Васильковська, доц., канд. техн. наук, **М.М. Ковальов**, канд. с.-г. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: vasilkovskakv@ukr.net

Технічне та технологічне забезпечення краплинного зрошення овочевих культур

В статті запропоновано схему краплинного зрошення для вирощування овочевих культур на присадибній ділянці. Проведена серія досліджень із забезпечення вологою ділянки та збереження повітрообміну ґрунту. Запропоновано розрахунок та схему краплинного зрошення стрічкового типу. В запропонованій конструкції для краплинного зрошення ділянки під овочеві культури використано ємність з водою для забезпечення невеликого постійного тиску води в стрічках. Це дало змогу здійснювати полив за необхідністю, а також використовувати ємність для розчину для підживлення рослин, захисту їх від стресів, покращення розвитку та збільшення врожайності. Використання краплинного зрошення дало змогу з'явитись першим плодам на декаду раніше та збільшити врожайність на 25-50%.

зміна кліматичних умов, краплинне зрошення, овочеві культури, стрічка, ґрунт

© К.В. Васильковська, М.М. Ковальов, Л.А. Молокост, 2020

К.В. Васильковська, доц., канд. техн. наук, **Н.Н. Ковалев**, канд. с.-г. наук, **Л.А. Молокост**, препод.
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Техническое и технологическое обеспечение капельного орошения овощных культур

В статье предложена схема капельного орошения для выращивания овощных культур на приусадебном участке. Проведена серия исследований по обеспечению влагой участка и сохранения воздухообмена почвы. Предложено расчет и схему капельного орошения ленточного типа. В предлагаемой конструкции для капельного орошения участка под овощные культуры использовано емкость с водой для обеспечения небольшого постоянного давления воды в лентах. Это позволило осуществлять полив при необходимости, а также использовать емкость для приготовления раствора для подкормки растений, защиты их от стрессов, улучшения развития и увеличения урожайности. Использование капельного орошения позволило появиться первым плодам на декаду раньше и увеличить урожайность на 25-50%.

изменение климатических условий, капельное орошение, овощные культуры, лента, почву

Постановка проблеми. Вигідне географічне положення та прийнятні природо-кліматичні умови разом із винятковими чорноземами роблять Україну однією із найбільш перспективних виробників продовольства у світі. Першочерговою умовою точного землеробства є забезпечення оптимальних умов росту і розвитку для насінини. Із зміною кліматичних умов, як в Україні, так і в Світі, постає необхідність забезпечення рослини світлом, повітрям та водою в повній мірі, тому використання краплинного зрошення для аграрного виробництва є новим викликом для виробників сільськогосподарської продукції та необхідною умовою забезпечення сталого майбутнього врожаю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Краплинне зрошення характеризується наявністю постійної розподільної мережі під тиском, що дозволяє здійснювати безперервні або періодичні поливи рослин. При краплинному зрошенні зволожується тільки обмежена частина ґрунтової поверхні, без поверхневого стоку в глибинні шари ґрунту. Такий вид зрошування дозволяє підтримувати вологість кореневого шару ґрунту під час всього вегетаційного періоду на оптимальному рівні без значних її коливань, характерних для всіх інших способів зрошування. При краплинному зрошенні зволоження ґрунту здійснюється капілярним шляхом. За рахунок цього зберігаються оптимальні водно-фізичні властивості ґрунту [1-7].

У південних і східних областях України, а із зміною кліматичних умов, і в центральній частині України, де вода, лімітований фактор, без зрошення виростити урожай дуже складно. Прийшов час краплинного зрошення [6]. Врожайність сільськогосподарських культур прямопропорційна рівню розвитку агротехніки та застосовуваних заходів меліорації. На отриману кількість і якість врожаю впливає забезпеченість вирощуваних рослин водою і корисними поживними речовинами [1].

Постановка завдання . Метою написання статті є обґрунтування застосування краплинного зрошення для отримання сталих врожаїв овочевих культур та збереження екологічних функцій ґрунту в умовах зміни кліматичних умов.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день краплинне зрошування є найпрогресивнішим способом поливу, що дозволяє найбільш раціонально використовувати водні ресурси та створювати оптимальні умови розвитку рослин [1, 2, 7]. Краплинне зрошування (окрім дощування) сприяє більш ранньому врожаю та не викликає ерозію ґрунту. До основних переваг краплинного зрошення слід віднести:

1) скорочення витрат води, яка надходить безпосередньо в прикореневу зону та зволожує ґрунт виключно в місцях посадки рослин;

2) зменшення забур'яненості посівів та зниження рівня поширення фітопатології, так як волога надходить дозовано, а технологічні проходи, доріжки та міжряддя залишаються сухими;

3) збереження структури ґрунту, покращення його повітряного режиму, і як наслідок, не утворення ґрунтової кірки;

4) виключення ризику запливання ґрунту, завдяки чому коренева система має змогу розвиватися рівномірно та не відчувати дефіциту кисню;

5) окупність вартості повністю укомплектованого набору для краплинного зрошування в короткий термін;

6) наявність простого і швидкого монтажу комплекту та можливість ремонту та заміни стрічок в разі їх механічних пошкоджень;

7) джерелом води може бути будь-яка містка ємність з водою (колодязь, водойма, центральний водопровід, бочка та ін.). При цьому для початку роботи досить мінімального робочого тиску в трубах (до 0,5 атм) та стрічках (до 3 атм).

Але поруч із незаперечними перевагами є і ряд недоліків краплинного зрошення. Основним недоліком є періодичне засмічення стрічок та фільтрів солями та домішками, які містяться у воді. Таким чином воду слід відстоювати та фільтрувати. Також у відкритому ґрунті краплинні стрічки та шланги (трубки) можуть бути пошкоджені комахами, гризунами або птахами.

Економічна ефективність застосування такої системи неможлива без попередніх агроінженерних розрахунків, виконаних з урахуванням потреб вирощуваної культури, площі та схеми поливу, геометрії ділянки, можливостей джерела водопостачання.

З метою підвищення технологічної ефективності вирощування овочевих культур на кафедрі загального землеробства Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено дослідний зразок системи краплинного зрошення для овочевих культур (рис. 1) [1, 2, 5].

Використовувана на для дослідження система краплинного зрошення складається з наступних компонентів (рис. 1):

- основне джерело водопостачання, найчастіше це насос для перекачування рідини в установленому обсязі;

- фільтр грубої очистки (встановлено перед краном), що забезпечує фільтрацію води, що допомагає знизити ризик формування засмічень в магістральних трубах і крапельниках;

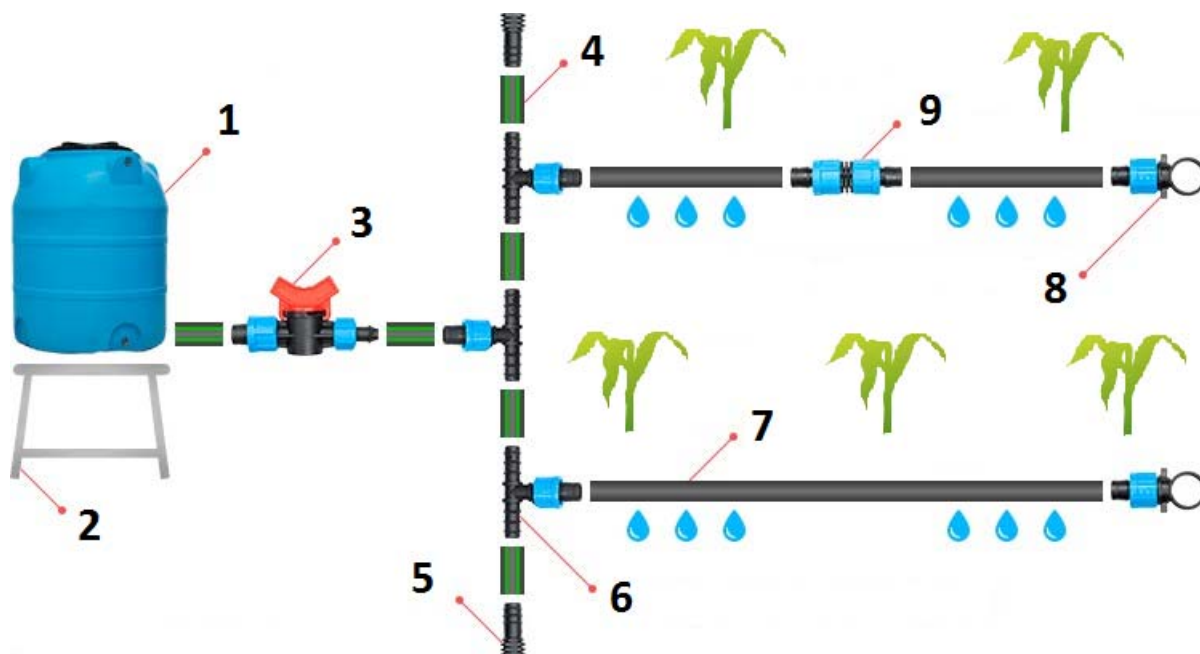
- герметично закритий бак з водою (бочка) – вузол підготовки і внесення добрив, для збагачення ґрунту мінералами й корисними компонентами. Підставка в 1,0-1,5 м дозволяє створювати додатковий потік із суміші добрив і рідини через систему;

- магістральний і розвідний трубопровід, що забезпечують вільне транспортування води або водного розчину добрив до крапельниць для поливу;

- регулятор тиску (понижувальний клапан), який встановлено після фільтра, з його допомогою можна контролювати об'єм вилитої рідини за одиницю часу, що зручно коли необхідно швидко провести полив;

- сполучна і запірна арматура, що регулює елементи, які використовуються для запуску і припинення роботи всієї системи (регулює таймер поливу) краплинного поливу. Найчастіше використовуються кути та трійники, перехідники та муфти, крани та заглушки, спеціальні фітинги, виготовлені з якісних матеріалів, не схильних до корозійного впливу;

- краплинні стрічки, за допомогою яких відбувається краплинне зрошення рослин. Відстань між водовипускними отворами в стрічках може варіюватися в межах 30-200 см.



1 – ємність з водою (бочка); 2 – підставка (1,0-1,5 м) для створення тиску; 3 – кран; 4 – основний шланг; 5 – заглушки на шланг; 6 – Т-образний перехідник; 7 – крапельна стрічка; 8 – заглушка на стрічку; 9 – ремонтне з'єднання

Рисунок 1 – Типова схема крапельного зрошення для присадибної ділянки:

Джерело: розроблено авторами із використанням [1]

Розглянемо порядок проектування зрошувальної системи для краплинного зрошення.

1. Визначення потреб у воді з урахуванням можливостей джерела водопостачання. Так, як не завжди є можливість для використання централізованого водопроводу, то можна використовувати ємність для набору води. В нашому випадку використовувалась бочка об'ємом в 250 л. При першому використанні замірявся час за який бочка з водою спорожніє.

Так, як ділянка під овочеві культури була 10 м в довжину на 4 м в ширину, то цієї рідини вистачало для якісного промочування ділянки.

Для зрошення 100 кущів томатів, висаджених рядами по 10 м кожен, використовуються чотири 10-метрові стрічки з відстанню між емітером 30 см. Продуктивність однієї крапельниці дорівнює 1,2 л / год, а норма поливу на 1 рослину - 1,5 л (загальний обсяг ємності - 250 л).

В такому випадку норма витрати всієї системи о 1 годині складе 80 л: кількість емітерів 33,3 шт. - (4x10 м) / 0,3 м) на норму поливу 1,2 л / год.

Для середніх і великих фермерських господарств, які в якості джерела використовують відкриті водойми, обов'язковою умовою в роботі систем краплинного зрошення є застосування фільтраційних систем. Їх пропускна здатність – один з важливих показників, необхідних для розрахунку допустимого добового водоспоживання. Визначимо пропускну здатність фільтраційної системи:

$$Q = \frac{60 \cdot S}{T}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (1)$$

60 – максимальна зрошувальна норма на добу, м³/а;

S – площа ділянки для зрошення на, га;

T – запланований час роботи системи в добу, 16-20 ч.

Виходячи з цього, час зрошення – 1 година 50 хв.

2. Розрахунок довжини зрошувальної стрічки.

На цьому етапі враховується вимоги культури вирощування, займана нею площа та схема посадки. Для кожної культури необхідний метраж розраховується окремо за формулою:

$$L_c = \frac{1000 \cdot S_k}{(L)}, \text{ м} \quad (2)$$

де S_k – площа оброблюваної культури, га;

10000 – коефіцієнт для перекладу га в м²;

L – відстань між зрошувальними трубами (відповідає ширині міжрядь), м.

Таким чином, отримуємо необхідну кількість краплинної стрічки (трубки).

Отже, для досліджуваної ділянки використовувалось 4 по 10 метрів крапельної стрічки, загальна труба довжиною 4,5 метрів, ємність з водою, 4 заглушки для стрічок, дві заглушки для труби, фільтр та трійники для з'єднання труби і стрічок, а також труби із ємністю із водою (рис. 2).



Рисунок 2 – Загальний вигляд частини дослідної ділянки з вирощування томатів та загальний вигляд мережі краплинних стрічок для зрошення

Джерело: розроблено авторами

Використання на дослідній ділянці системи краплинного стрічкового зрошення дало змогу підвищення кількості та якості врожаю томатів. Також використання краплинного зрошення дозволило підтримувати оптимальний водно-фізичний режим в кореновому шарі ґрунту, що створило умови для отримання кращого врожаю.

Частота поливів регулювалась в повній відповідності з водоспоживанням рослин, підтримуючи оптимальну вологість та даючи рослинам можливість легко отримувати воду та за необхідності живильні речовини. Таким чином, збільшення врожаю за рахунок застосування краплинного способу поливу та живлення рослин зазвичай досягає на овочевих культурах до 50% (при цьому дозрівання овочів відбувається на 5-10 днів раніше).

Також при використанні краплинного зрошення процес поливу є автоматизованим, що в свою чергу приводить до значної економії трудовитрат.

Але найголовнішою позитивною характеристикою краплинного зрошення є можливість ефективнішого використання води. Зниження витрат води при використанні систем краплинного поливу складає від 20 до 80% порівняно з іншими методами зрошення.

Висновки. Таким чином, із зміною кліматичних умов, більша частина Кіровоградської області потрапила в зону ризикованого землеробства, завдяки цьому постала гостра потреба у використанні систем поливу рослин. Краплинне зрошення має майже універсальне застосування, є ефективним при інтенсивних технологіях вирощування сільськогосподарських і декоративних культур, а також на садових ділянках, коли стан рослини в значній мірі залежить від точності підтримки режиму вологості та режиму харчування рослин.

Список літератури

1. Крапельне зрошення – вся інформація про крапельний полив. *Журнал «Зерно»*. URL: <https://www.zerno-ua.com/guides/krapelne-zroshennya/> (дата звернення 16.09.2020)
2. Розрахунок і проектування систем крапельного поливу. *Інформаційно-аналітична система «Аграрії разом»*. URL: <https://agrarii-razom.com.ua/article/rozrahunok-i-proektuvannya-sistem-kraplinnogo-polivu> (дата звернення 23.08.2020)
3. Сало Л. В., Кулик Г. А. Вплив мікродобрив лінійки Актив Харвест на врожайність томатів. *Вісник ХНАУ. Серія : Рослинництво, селекція і насінництво, плодовоовочівництво і зберігання*. - 2019. № 2. С. 65-71.
4. Коковіхін С.В. Науково-методичні основи встановлення закономірностей та розробки математичних моделей формування урожаю польових культур при зрошенні: монографія. Херсон : Айлант, 2010. 246 с.
5. Мисик Г.А., Куліковський Б.Б. Основи меліорації та ландшафтознавства. Посібник. – К: «ІНКОС», 2005. 464с
6. Краплинне зрошення – сучасний метод поливу. *Державне агентство водних ресурсів України, Басейнове управління водних ресурсів нижнього Дніпра*. URL: <https://buvrnd.gov.ua/materialy-625.htm?ps=3> (дата звернення 16.09.2020)
7. Mostipan, M.I., Vasytkovska, K.V., Andriyenko, O.O., and Reznichenko, V.P.. Modern aspects of tilled crops productivity forecasting. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53, 2017. pp. 35–40.

Referencis

1. Krapelne zroshennia – vsia informatsiia pro krapelnyi polyv [Drip magnification - all information about drip fields]. *Журнал «Зерно»*. – *Journal "Zerno"*. Retrieved from <https://www.zerno-ua.com/guides/krapelne-zroshennya/> [in Ukrainian].
2. Rozrakhunok i proektuvannia system krapelnoho polyvu. [Development and design of drip irrigation system.]. *Informatsiino-analitychna systema «Ahrarii razom» – Information and analytical system "Agrarians together"*. Retrieved from <https://agrarii-razom.com.ua/article/rozrahunok-i-proektuvannya-sistem-kraplinnogo-polivu> [in Ukrainian].
3. Salo, L.V., Kulyk, H.A. (2019). Vplyv mikrodobryv liniiky Aktyv Kharvest na vrozhaunist tomativ [Influence of microfertilizers of the Active Harvest line on tomato yield]. *Visnyk KhNAU. Seriia : Roslynnytstvo, selektsiia i nasinnytstvo, plodoovochivnytstvo i zberihannia – Bulletin of KhNAU. Series: Crop production, selection and seed production, fruit and vegetable growing and storage, Vol. 2*, 65-71 [in Ukrainian].
4. Kokovikhin, S.V. (2010). *Naukovo-metodychni osnovy vstanovlennia zakonovirnostei ta rozrobky matematychnykh modelei formuvannia urozhaiu polovykh kultur pry zroshenni: monohrafiia [Scientific and methodical bases of establishment of regularities and development of mathematical models of formation of a crop of field cultures at irrigation: monograph]*. Kherson: Aylant [in Ukrainian].
5. Mysyk, H.A. & Kulikovskiy, B.B. (2005). *Osnovy melioratsii ta landshaftoznavstva [Fundamentals of land reclamation and landscape science]*. Kyiv: "INKOS" [in Ukrainian].
6. Kraplynne zroshennia – suchasnyi metod polyvu [Drip irrigation is a modern method of watering]. *Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy, Baseinove upravlinnia vodnykh resursiv nyzhnogo Dnipra – State Agency of Water Resources of Ukraine, Basin Department of Water Resources of the Lower Dnieper*. Retrieved from <https://buvrnd.gov.ua/materialy-625.htm?ps=3> [in Ukrainian].
7. Mostipan, M.I., Vasytkovska, K.V., Andriyenko, O.O. & Reznichenko, V.P. (2017). Modern aspects of tilled crops productivity forecasting. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53, 35–40 [in English].

Kateryna Vasytkovska, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Kovalov**, PhD Agr. sci., **Ludmyla Molokost**, lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Technical and Technological Support of Drip Irrigation of Vegetable Crops

The article proposes a scheme of drip irrigation for growing vegetables in the backyard. In the conditions of change of climatic conditions, the question of lack of moisture sharply arises. For growing vegetables in areas of risky agriculture, irrigation is an important condition for obtaining high yields.

In order to increase the technological efficiency of growing vegetables at the department of general agriculture of the Central Ukrainian National Technical University developed a prototype of a drip irrigation system for vegetables. A series of studies was conducted to provide moisture to the site and preserve soil air exchange. With the use of conventional irrigation, possible negative consequences in the form of soil flooding, the root system of plants is not able to develop evenly and is deficient in oxygen. The calculation and the scheme of drip irrigation of tape type are offered. In the proposed design for drip irrigation of the area under vegetable crops used a container with water to provide a small constant water pressure in the strips. This made it possible to water as needed, as well as to use a solution tank to feed the plants, protect them from stress, improve development and increase yields. The use of drip splicing allowed the first fruits to appear a decade earlier and increase yields by 25-50%. The use of drip tape irrigation system on the experimental plots allowed to increase the quantity and quality of tomato harvest. Also, the use of drip irrigation allowed to maintain the optimal water-physical regime in the root layer of the soil, which created the conditions for a better harvest.

Thus, with the change of climatic situation, most of the Kirovohrad region was looking for in the zone of risky agriculture. Drip irrigation has an almost universal application, is effective in intensive technologies for growing crops and ornamental crops, as well as in garden areas, when the condition of the plant largely depends on the accuracy of maintaining the humidity and nutrition of plants.

changing climatic conditions, drip irrigation, vegetable crops, watering tape, soil

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.333:631.172

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.41-51>

А.С. Лімонт, доц., канд. техн. наук

Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна

e-mail: andrespartak@ukr.net

З.А. Лімонт, студ.

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна

Вантажопідйомність і споживана потужність кузовних машин для внесення твердих органічних добрив

Мета дослідження полягала у з'ясуванні споживаної потужності кузовними машинами для внесення твердих органічних добрив виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу та компаніями «Strautmann» і «KUN» залежно від вантажопідйомності машин та пошуку якісно-кількісних зв'язків питомої потужності машин і їх вантажопідйомності. В якості питомої потужності прийнято відношення споживаної потужності до вантажопідйомності аналізованих машин.

Залежно від вантажопідйомності машин споживана ними потужність з урахуванням заводів-виробників збільшується за прискорено зростаючими степеневими функціями і прямою з додатним кутовим коефіцієнтом. Питома потужність машин із збільшенням їх вантажопідйомності зменшується за гіперболічними кривими і прямою з від'ємним кутовим коефіцієнтом.

кузовні машини для внесення твердих органічних добрив, виробники машин, вантажопідйомність, споживана потужність, питома потужність, рівняння регресії

© А.С. Лімонт, З.А. Лімонт, 2020

А.С. Лимонт, доц., канд. техн. наук

Житомирский агротехнический колледж, г. Житомир, Украина

З.А. Лимонт, студ.

Днепровский национальный университет им. Олеся Гончара, г. Днепр, Украина

Грузоподъемность и потребляемая мощность кузовных машин для внесения твердых органических удобрений

Цель исследования состояла в определении потребляемой мощности кузовными машинами для внесения твердых органических удобрений производства предприятиями на территории бывшего Советского Союза, компаниями «Strautmann» и «KUHN» в зависимости от грузоподъемности машин и поиске качественно-количественных связей удельной мощности машин и их грузоподъемности. В качестве удельной мощности принято отношение потребляемой мощности к грузоподъемности анализируемых машин.

В зависимости от грузоподъемности машин потребляемая ими мощность с учетом заводоизготовителей увеличивается по ускоренно-возрастающим степенным функциям и прямой с положительным угловым коэффициентом. Удельная мощность машин с увеличением их грузоподъемности уменьшается по гиперболическим кривым и прямой с отрицательным угловым коэффициентом.

кузовные машины для внесения твердых органических удобрений, изготовители машин, грузоподъемность, потребляемая мощность, удельная мощность, уравнения регрессии

Постановка проблеми. Удобрєння ґрунту, як фактора урожайності і якості сільськогосподарських культур та якості виготовленої продукції в результаті переробки урожаю, здійснюють і твердими органічними добривами (ТОД), на внесенні яких поряд з іншими використовують кузовні машини [1, 2]. Проте в проблемі конструювання, виробництва та експлуатації таких машин поки що є ще ціла низка нез'ясованих питань. Про деякі з цих питань піде мова в представленій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Машинно-тракторні агрегати (МТА) у складі з кузовними машинами для внесення ТОД відносять до тягово-приводних, в яких потужність тракторного двигуна витрачається на самопересування трактора і роботу машин. В основі розрахунків з комплектування МТА і обґрунтування режимів його використання лежить необхідна (споживана) потужність для роботи машин з внесення ТОД [3, 4]. Потужність для роботи машин включає потужність на привод робочих органів від вала відбору потужності (ВВП) трактора та тягу машин [5, 6]. Робочими органами машин з внесення ТОД є живильний (подавальний) транспортер (конвейер) і розкидальні барабани [7]. Передумови і елементи розрахунку потужності для привода подавального транспортера висвітлені в роботах [6, 7, 8], а для привода розкидальних барабанів в [5–7 і 9–12].

В літературних джерелах зустрічаємо інформацію про питому витрату потужності на привод робочих органів машин від ВВП трактора. Так, за даними [13] ця потужність коливається в межах 3,1–7,2 кВт на 1 м ширини захвату, а за даними [14] стосовно машини ПРТ-10 приймає значення від 4 до 6 кВт/м. За технічною характеристикою машин більшої їх кількості ширина внесення ТОД коливається в межах 6–8 м, але є машини, що мають більшу ширину внесення – 8–12 м (РТД-9) і 10–12 м (МТО-12) та з меншою шириною розподілу в межах 4–8 м (РОУ-6) і 5 м (РТО-4). Ширина розкидання добрив розкидачами фірми «Hesston» коливається в межах 2,7–3,2 м. При цьому габаритна ширина більшості розкидачів ТОД становить 2,5 м, а довжина горизонтально розміщених розкидальних барабанів деяких кузовних машин коливається в межах 1670–2100 мм і 2700 мм (РПН-4). Внутрішня ширина кузова окремих моделей машин компанії «Strautmann» становить, наприклад, 1800 мм та 1930 і 2200 мм. Вважаємо доцільнішим і методично коректнішим споживану $N_{\text{од}}$ і питому $N_{\text{пп}}$ потужність машин аналізувати залежно від їх вантажопідйомності q_n (т), оскільки остання у переважної більшості марок кузовних машин коливається в межах 2–24 і

доходить до 34 т, що значно перевищує мінливість робочої ширини розкидання добрив.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є поліпшення технологічного процесу внесення твердих органічних добрив кузовними машинами шляхом удосконалення методики проектування їх комплектування з урахуванням споживаної потужності. *Завдання дослідження:* 1) охарактеризувати розподіли вантажопідйомності машин для внесення твердих органічних добрив різних виробників; 2) зібрати і опрацювати інформацію про витрату потужності на привод робочих органів машин від ВВП трактора та роботу машин; 3) розрахувати питому потужність на привод робочих органів машин від ВВП трактора та роботу машин; 4) з'ясувати кореляційні зв'язки між споживаною і питомою потужністю на привод робочих органів від ВВП трактора та роботу машин як результативними ознаками і їх вантажопідйомністю як факторіальною; 5) дослідити кількісні зв'язки між результативними і факторіальною ознаками та відшукати модельні лінії регресії результативних ознак на факторіальну.

Об'єкти і методика дослідження. Об'єктами дослідження були кузовні машини для внесення ТОД виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу та компаній «Strautmann» і «KUNH». Інформацію про вантажопідйомність машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу вибирали з відповідних Каталогів сільськогосподарської техніки. Щодо машин виробництва компаніями «Strautmann» і «KUNH», то тут були використані проспекти відповідних розкидачів добрив [15] та Каталог техніки компанії «KUNH» [16]. Вантажопідйомність розкидачів добрив виробництва компаніями «Strautmann» і «KUNH» з'ясована з урахуванням інформації про допустиму загальну вагу машин та їх максимальне завантаження в кг.

Дані про витрату потужності на привод робочих органів від ВВП трактора кузовних машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу вибирали із джерел [10, 17, 18]. Наведену в технічних описах розкидачів добрив виробництва компаніями «Strautmann» і «KUNH» інформацію про мінімальну потужність для роботи відповідних машин розглядали як споживану машинами потужність при внесенні ТОД. Питому потужність визначали як частку від ділення споживаної потужності на вантажопідйомність машини.

Обробка зібраних і розрахованих даних здійснена на засадах кореляційно-регресійного аналізу та з використанням стандартних комп'ютерних програм. Пошук відповідних модельних рівнянь регресії результативних ознак на факторіальну здійснено за R^2 -коефіцієнтом шляхом вирівнювання «експериментальних» значень результативних ознак залежно від факторіальної за прямолінійними залежностями та гіперболами, степеневими, логарифмічними, експоненціальними і показниковими кривими.

Виклад основного матеріалу. Результати кореляційного аналізу досліджуваних зв'язків наведені в табл. 1. В цій же таблиці з використанням обчислених середніх квадратичних відхилень результативних ознак і визначених відповідних показників кореляційного зв'язку наведені значення помилок опрацьованих рівнянь регресії та коефіцієнти детермінації, що визначають і характеризують силу впливу факторіальної ознаки на досліджувані результативні.

Таблиця 1 – Показники кореляційного зв'язку між споживаною та питомою потужністю машин для внесення твердих органічних добрив різних виробників і вантажопідйомністю машин та помилки рівнянь регресії і коефіцієнти детермінації

Підприємства-виробники машин	Коефіцієнт кореляції r	Кореляційне відношення η	Помилка рівняння регресії S_y	Коефіцієнт детермінації k_d
Споживана потужність				
Що розміщені на теренах колишнього Радянського Союзу	0,560	0,877	7,76	0,770
Компанії «Strautmann»	0,963	0,961	8,21	0,927
Компанії «KUNH»	0,919	0,944	10,5	0,891
Питома потужність				
Що розміщені на теренах колишнього Радянського Союзу	-0,547	0,756	0,79	0,571
Компанії «Strautmann»	-0,530	0,542	0,60	0,281
Компанії «KUNH»	-0,564	0,725	0,89	0,526

Джерело: розроблено авторами

Додатні значення коефіцієнтів кореляції в досліджуваних парних статистичних зв'язках свідчать про підвищення споживаної потужності машинами із збільшенням їх вантажопідйомності, а від'ємні – є ознакою зниження питомої потужності машин в міру підвищення їх вантажопідйомності. Перевищення кореляційних відношень над коефіцієнтами кореляції в деяких парних зв'язках спонукає до з'ясування та уточнення характеру відповідних зв'язків. Це з'ясування і уточнення здійснені шляхом апроксимації кількісної зміни результативних ознак залежно від факторіальної відповідними рівняннями прямої і криволінійної регресії.

За R^2 -коефіцієнтом найкраще наближення зібраних статистичних і вирівняних значень $N_{од}$ (кВт) забезпечила апроксимація статистичних даних споживаної потужності на привод робочих органів від ВВП трактора машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу залежно від q_n (т) рівнянням прискорено зростаючої степеневі функції ($R^2=0,770$). У разі апроксимації досліджуваної зміни рівняннями експоненти і показникової кривої R^2 -коефіцієнт приймав значення 0,756. Якщо ж зміну $N_{од}$ залежно від q_n машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу подати рівнянням прямої з додатним кутовим коефіцієнтом, то таку зміну оцінює R^2 -коефіцієнт, що дорівнює 0,709. За апроксимації зміни $N_{од}$ залежно від q_n рівнянням логарифмічної кривої $R^2=0,670$. Рівняння степеневі кривої має вигляд:

$$N_{од} = 5,573 q_n^{0,681} \quad (1)$$

$$\text{при } r = 0,560; \eta = 0,877; R^2 = 0,770; S_y = 7,76 \text{ і } k_d = 0,770 ,$$

а прямої –

$$N_{од} = 6,726 + 1,983 q_n . \quad (2)$$

З рівняння (2) прямої лінійної зміни $N_{од}$ залежно від q_n за значенням кутового коефіцієнта рівняння регресії випливає, що з підвищенням вантажопідйомності машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу на 1 т за її зміни від 2 до 24 т споживана потужність зростає майже на 2 кВт. На рис. 1 наведені кореляційне поле значень $N_{од}$ і q_n та модельна лінія (крива 1) степеневі регресії $N_{од}$ на q_n , що побудована за рівнянням (1).

З графіка модельної лінії регресії простежується, що із підвищенням вантажопідйомності машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу від 2 до 10 т потужність на привод робочих органів від ВВП трактора зростає майже прямолінійно, а з подальшим підвищенням вантажопідйомності від 10 до 15 т і далі до 24 т темп зростання $N_{\text{од}}$ збільшується більш прискорено з показником степеня при аргументі (вантажопідйомності), що більший від нуля, але менший від одиниці.

Апроксимація зібраних статистичних даних про споживану потужність машин для внесення ТОД компанії «Strautmann» залежно від вантажопідйомності машин рівнянням прямої з додатним кутовим коефіцієнтом та зростаючими степеневою, логарифмічною, експоненціальною та показниковою кривими показала, що за R^2 -коефіцієнтом найкраще вирівнювання забезпечує рівняння прямої, за якого R^2 -коефіцієнт приймав значення 0,928. З криволінійних функцій допустимо апроксимувати зміну $N_{\text{од}}$ залежно від q_n рівнянням прискорено зростаючої степеневої функції, яка забезпечує значення R^2 -коефіцієнта, що дорівнює 0,924. При цьому показник степеня при незалежній змінній (вантажопідйомності машини), становив 0,961, а сталий коефіцієнт рівняння дорівнював 6,69 кВт. Рівняння прямолінійної зміни $N_{\text{од}}$ залежно від q_n має вигляд:

$$N_{\text{од}} = 8,48 + 5,228 q_n. \quad (3)$$

З рівняння (3) за значенням кутового коефіцієнта підвищення вантажопідйомності машин виробництва компанією «Strautmann» на 1 т при її зміні від 5,8 до 34 т викликає збільшення споживаної потужності майже на 5,25 кВт. Модельна лінія прямолінійної регресії $N_{\text{од}}$ на q_n наведена на рис. 1.

Вантажопідйомність досліджуваних машин для внесення ТОД виробництва компанією «KUNN» коливалася від 4,5 до 22,7 т, а споживана ними потужність змінювалася в межах 44–165 кВт. Вирівнювання зібраних статистичних даних про споживану потужність залежно від вантажопідйомності машин здійснено за прямою з додатним кутовим коефіцієнтом ($R^2=0,844$) та криволінійними залежностями – степеневою ($R^2=0,853$), експоненціальною і показниковою ($R^2=0,891$) та логарифмічною ($R^2=0,776$) і гіперболою ($R^2=0,690$). З аналізованих залежностей найкраще вирівнювання за R^2 -коефіцієнтом забезпечила апроксимація статистичних даних про споживану потужність рівнянням прискорено зростаючої експоненти вигляду:

$$N_{\text{од}} = 35,290 \exp(0,068 q_n) \quad (4)$$

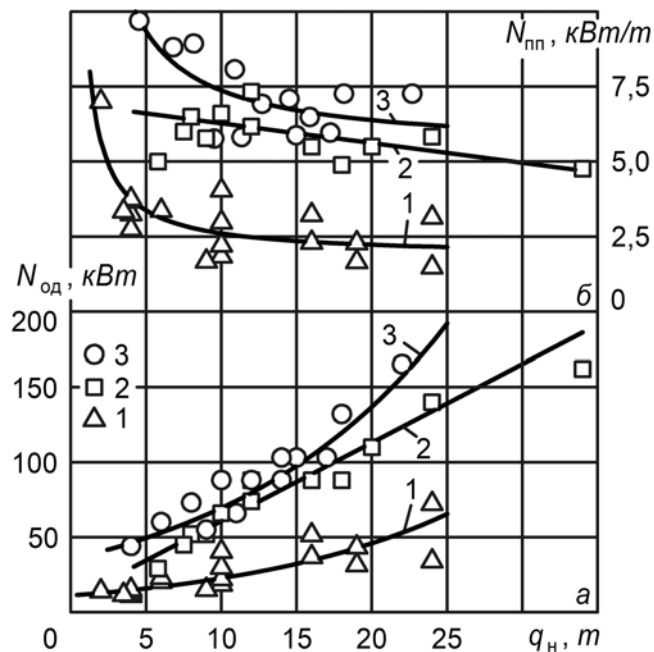
при $r = 0,919$; $\eta = 0,944$; $R^2 = 0,891$; $S_y = 10,5$ кВт і $k_d = 0,891$.

Графік прискорено зростаючої експоненти, що побудований за залежністю (4), наведений на рис. 1. З графічного подання рівняння (4) виразно простежується характер прискорено зростаючої зміни споживаної потужності машинами для внесення ТОД виробництва компанією «KUNN» з підвищенням їх вантажопідйомності. З підвищенням вантажопідйомності машин від 4,5 до 22,7 т (у 5 разів) споживана ними потужність зростає від 44 до 165 кВт (у 3,75 раза).

З рівняння прямолінійної зміни споживаної потужності залежно від вантажопідйомності машин, що має вигляд

$$N_{\text{од}} = 14,60 + 5,922 q_n, \quad (5)$$

за кутовим коефіцієнтом рівняння регресії підвищення вантажопідйомності машин виробництва компанією «KUHN» на 1 т призводить до збільшення споживаної потужності майже на 6 кВт.



1 – машини виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу; 2 – машини виробництва компанією «Strautmann»; 3 – машини виробництва компанією «KUHN»

Рисунок 1 – Зміна споживаної $N_{од}$ (а) і питомої $N_{пп}$ (б) потужності на привод робочих органів від ВВП трактора (1) та споживаної $N_{од}$ (а) і питомої $N_{пп}$ (б) потужності на роботу машин (2, 3) для внесення твердих органічних добрив залежно від вантажопідйомності q_n машин

Джерело: розроблено авторами

Питома потужність досліджуваних машин з внесення ТОД на привод робочих органів від ВВП трактора виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу коливалася в межах від 1,48 до 7,0 кВт/т. У разі вирівнювання цієї потужності залежно від вантажопідйомності машин за прямою з від'ємним кутовим коефіцієнтом R^2 -коефіцієнт дорівнював 0,281, за експонентою і показниковою кривою – 0,322, логарифмічною і степеневою функцією відповідно 0,410 і 0,411 та гіперболою – 0,571. З досліджуваних апроксимуючих залежностей найкраще наближення до статистичних даних про питому потужність забезпечило вирівнювання за спадною гіперболою вигляду:

$$N_{пп} = 1,847 + 7,633 / q_n \quad (6)$$

при $r = -0,547$; $\eta = 0,756$; $R^2 = 0,571$; $S_y = 0,79$ і $k_d = 0,571$.

Графік зміни питомої потужності машин для внесення ТОД виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу, що побудований за залежністю (6), наведений на рис. 1. З рисунка видно, що найбільш інтенсивно зменшується питома потужність при підвищенні вантажопідйомності машин від 2 до 10 т. З підвищенням вантажопідйомності від 10 до 15 т інтенсивність зменшення питомої потужності дещо уповільнюється, а з подальшим підвищенням вантажопідйомності від

15 до 20 т і далі значно уповільнюється, сягаючи відповідного асимптотичного значення. Таке значення питомої потужності дорівнює вільному члену рівняння гіперболи (6), що являє його асимптоту, яка становить близько 2,0 кВт/т.

З рівняння прямолінійної зміни питомої потужності аналізованих машин залежно від їх вантажопідйомності, що має вигляд

$$N_{\text{пп}} = 4,02 - 0,093 q_n, \quad (7)$$

за значенням кутового коефіцієнта рівняння регресії підвищення вантажопідйомності машин на 1 т супроводжується зниженням питомої потужності майже на 0,1 кВт/т.

Дослідження питомої потужності машин для внесення ТОД виробництва компанією «Strautmann» показали, що стосовно цих машин питома потужність коливалася в межах 4,63–7,33 кВт/т. Якщо апроксимувати зміну питомої потужності машин залежно від їх вантажопідйомності рівнянням прямої з від'ємним значенням кутового коефіцієнта, то за такої апроксимації R^2 -коефіцієнт дорівнює 0,281. Якщо ж досліджувану зміну апроксимувати рівнянням спадної гіперболи, то R^2 -коефіцієнт дорівнюватиме 0,222. За апроксимації зміни $N_{\text{пп}}$ залежно від q_n рівняннями прискорено спадних степеневі і логарифмічної функції R^2 -коефіцієнт, що оцінює вірогідність апроксимації, приймає значення відповідно 0,283 і 0,266. При цьому в площині рисунка криві гіперболи та степеневі і логарифмічної функцій зрушуються відповідно униз до координатної осі вантажопідйомності та ліворуч ближче до координатної осі питомої потужності. У разі вирівнювання статистичних даних про питому потужність машин виробництва підприємствами компанії «Strautmann» залежно від їх вантажопідйомності рівняннями спадних експоненти і показникової функції R^2 -коефіцієнт приймав найбільше значення і становив 0,294. У графічному поданні модельні лінії регресії за експоненціальною і показниковою функціями накладаються на прямолінійну зміну $N_{\text{пп}}$ залежно від q_n . Враховуючи викладене, вважаємо можливим зміну $N_{\text{пп}}$ залежно від q_n прогнозувати за рівнянням прямої з від'ємним значенням кутового коефіцієнта вигляду

$$N_{\text{пп}} = 6,94 - 0,066 q_n \quad (8)$$

$$\text{при } r = -0,530; \eta = 0,542; R^2 = 0,281; S_y = 0,60 \text{ і } k_d = 0,281.$$

Кореляційне поле значень $N_{\text{пп}}$ і q_n та модельна лінія прямолінійної регресії $N_{\text{пп}}$ на q_n машин для внесення ТОД виробництва компанією «Strautmann», що побудована за рівнянням (8), наведені на рис. 1. За значенням кутового коефіцієнта рівняння регресії (8) з підвищенням вантажопідйомності машин на 1 т їх питома потужність зменшується майже на 0,07 кВт/т.

Якщо ж зміну питомої потужності машин залежно від їх вантажопідйомності подати рівнянням логарифмічної функції та степеневі залежності і гіперболи вигляду $N_{\text{пп}} = 5,18 + 10,26/q_n$, то найбільш інтенсивно зменшується питома потужність при підвищенні вантажопідйомності машин до 10 т, а з подальшим підвищенням вантажопідйомності зниження питомої потужності значно уповільнюється, сягаючи відповідного граничного значення. Така питома потужність з рівняння гіперболи за його асимптотою становить 5,18 кВт/т. Наближена до цього асимптотичного значення питома потужність властива машинам, що мають вантажопідйомність, яка перевищує 15 т. Наприклад, за розрахунками питома потужність машини VS1605, що має вантажопідйомність 17 т, становить 5,17 кВт/т. До машин, що мають незначно відмінні q_n і $N_{\text{пп}}$, можна віднести і машини VS1603, MS1401, VS2003 та ін.

Аналізовані машини для внесення ТОД виробництва компанією «KUNH» мали питому потужність, що коливалася в межах 5,77–9,70 кВт/т. Середнє арифметичне значення і середнє квадратичне відхилення розподілу питомої потужності машин компанії «KUNH» дещо перевищували аналогічні статистичні показники, що властиві розподілу питомої потужності машин виробництва компанією «Strautmann».

Вирівнювання статистичних даних про питому потужність машин для внесення ТОД виробництва компанією «KUNH» залежно від їх вантажопідйомності за рівнянням прямої з від'ємним значенням кутового коефіцієнта забезпечило одержання R^2 -коефіцієнта, що дорівнював 0,287. В одержаному рівнянні вільний член дорівнював 9,14 кВт/т, а кутовий коефіцієнт при регресорі (вантажопідйомності машини) становив мінус 0,148 кВт/т². За значенням кутового коефіцієнта прямолінійної регресії питомої потужності на вантажопідйомність машин підвищення останньої на 1 т супроводжується зменшенням питомої потужності майже на 0,15 кВт/т.

Більш вирогідним є вирівнювання статистичних даних про питому потужність машин компанії «KUNH» залежно від їх вантажопідйомності рівнянням спадної степеневі функції, за якої R^2 -коефіцієнт дорівнював 0,377. Така апроксимація свідчила, що з підвищенням вантажопідйомності машин інтенсивність уповільнення зниження їх питомої потужності зменшується і питома потужність може сягати відповідного граничного значення.

Граничне зменшення питомої потужності досліджуваних машин можна відшукати за асимптотою рівняння гіперболи. Апроксимація статистичних даних про питому потужність машин компанії «KUNH» залежно від їх вантажопідйомності за рівнянням спадної гіперболи показала, що за такого вирівнювання одержано найбільше значення R^2 -коефіцієнта, який у цьому випадку дорівнював 0,526.

Рівняння гіперболічної зміни питомої потужності $N_{\text{пп}}$ (кВт/т) машин для внесення ТОД виробництва компанією «KUNH» залежно від їх вантажопідйомності q_n (т) має вигляд:

$$N_{\text{пп}} = 5,397 + 19,735 / q_n \quad (9)$$

$$\text{при } r = -0,564; \eta = 0,725; R^2 = 0,526; S_y = 0,89 \text{ кВт/т і } k_d = 0,526.$$

Кореляційне поле значень $N_{\text{пп}}$ і q_n аналізованих машин компанії «KUNH» та графік зміни $N_{\text{пп}}$ залежно від q_n , що побудований за рівнянням (9), наведені на рис. 1. Найбільш інтенсивно знижується питома потужність машин при підвищенні їх вантажопідйомності від 4,5 до 10 т, з подальшим підвищенням вантажопідйомності від 10 до 15 т темп зниження питомої потужності дещо уповільнюється, а підвищення вантажопідйомності машин понад 15 т супроводжується подальшим зниженням їх питомої потужності до асимптотичного значення, що становить близько 5,4 кВт/т.

Висновки. Між споживаною потужністю машин для внесення твердих органічних добрив різних виробників і їх вантажопідйомністю виявлений додатний кореляційний зв'язок з коефіцієнтами кореляції в межах 0,560–0,963 за кореляційних відношень, що змінювалися від 0,877 до 0,961. Між питомою потужністю машин і їх вантажопідйомністю відшуканий від'ємний кореляційний зв'язок з коефіцієнтами кореляції від мінус 0,530 до мінус 0,564 за кореляційних відношень, що коливалися від 0,542 до 0,756. За коефіцієнтами детермінації із сукупного впливу різних факторів, що причинно зумовлюють споживану і питому потужність машин для внесення твердих органічних добрив, на вантажопідйомність цих машин припадає відповідно 77–93 і 28–57% варіації з урахуванням підприємств-виробників машин.

Залежно від вантажопідйомності машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу зміна споживаної потужності на привод робочих органів від ВВП трактора описується рівнянням прискорено зростаючої степеневі функції. Зміна споживаної потужності для роботи машин виробництва компанією «Strautmann» залежно від вантажопідйомності машин описується рівнянням прямої з додатним кутовим коефіцієнтом, а для роботи машин виробництва компанією «KUNH» – рівнянням прискорено зростаючої експоненти.

Зміна питомої потужності на привод робочих органів від ВВП трактора машин виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу залежно від вантажопідйомності машин описується рівнянням спадної гіперболи. Зміна питомої потужності на роботу машин виробництва компанією «Strautmann» залежно від вантажопідйомності машин описується рівнянням прямої з від'ємним значенням кутового коефіцієнта. Стосовно машин виробництва компанією «KUNH» така зміна описується рівнянням спадної гіперболи.

Помилки визначених рівнянь регресії споживаної потужності машин для внесення ТОД з урахуванням виробників цих машин приймали значення в межах 7,76–10,50 кВт, а помилки рівнянь питомої потужності коливалися від 0,60 до 0,89 кВт/т.

З'ясовані залежності можуть бути використані і при підготовці відповідних фахівців у вищих навчальних закладах.

Напрямок подальших досліджень на нашу думку варто спрямувати на пошук і з'ясування зв'язків між масою кузовних машин з внесенням ТОД та їх габаритними розмірами з одного боку і вантажопідйомністю машин з іншого.

Список літератури

1. Машины для внесения удобрений / В.И. Александров и др. *Справочник конструктора сельскохозяйственных машин*: в 4 т.; под ред. М.И. Клецкина. Т. 2. Москва: Машиностроение, 1967. С. 369–422.
2. Кругляков М.Л. Машины для внесения удобрений. Навозоразбрасыватели. *Справочник конструктора сельскохозяйственных машин*: в 2 т.; под ред. А.В. Красниченко. Т. 2. Москва: Машгиз, 1961. С. 255–259.
3. Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / Ільченко В.Ю. та ін.; за ред. В.Ю. Ільченка. Київ: Урожай, 1993. 288 с.
4. Практикум із машиновикористання в рослинництві / Лімонт А.С. та ін.; за ред. І.І. Мельника. Київ: Кондор, 2004. 284 с.
5. Якубаускас В.И. Технологические основы механизированного внесения удобрений. Москва: Колос, 1973. 231 с.
6. Марченко Н.М., Личман Г.И., Шебалкин А.Е. Механизация внесения органических удобрений (Технологические основы проектирования процессов и рабочих органов). Москва: Агропромиздат, 1990. 207 с.
7. Машины и оборудование для производства и внесения органических удобрений: конструирование и расчет / Линник Н.К. и др.; под ред. Л.В. Погорелого. Киев: Техника, 1992. 103 с.
8. Павловский И.В. Основы проектирования машин для внесения удобрений в почву. Москва: Машиностроение, 1965. 214 с.
9. Озол Я.Г. Выбор оптимальных параметров навозоразбрасывателей. *Тракторы и сельхозмашины*. 1965. № 4. С. 20–22.
10. Пособие по эксплуатации машинно-тракторного парка / Фере Н.Э., Бубнов В.З., Еленев А.В., Пильщиков Л.М. Москва: Колос, 1978. 256 с.
11. Переходько О.Я., Ярошук В.А. Обґрунтування раціональної ширини внесення твердих органічних добрив кузовними розкидачами. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Київ: Урожай, 1992. Вип. 75. С. 70–74.
12. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин: машини для приготування і внесення добрив. Харків: Око, 2002. Т. 1. Ч. 3. 352 с.
13. Кленин Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Элементы теории

- рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы. Москва: Колос, 1980. 671 с.
14. Довідник сільського інженера / Гречкосій В.Д. та ін.; за ред. В.Д. Гречкосія. Київ: Урожай, 1991. 400 с.
 15. B. Strautmann & Söhne GmbH & Co. KG. Проспекти розкидачів добрив компанії. KUHN. Каталог техніки. 2018. 64 с.
 16. Справочник по скоростной сельскохозяйственной технике / А.Я. Поляк и др. Москва: Колос, 1983. 287 с.
 17. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Ляхов А.П. и др.; под ред. Ю.В. Будько. Минск: Ураджай, 1991. 336 с.

References

1. Aleksandrov, V.I. et al. (1967). Fertilizer machines. *Agricultural Machinery Designer Handbook*: M.I. Kleckina (Ed.). (Vols 1 - 4; Vol. 2). Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
2. Krugljakov, M.L. (1961). Fertilizing machines. Manure spreaders. *Agricultural Machinery Designer Handbook*. A.V. Krasnichenko (Ed.). (Vols. 1 - 2; Vol. 2). Moskva: Mashgiz [in Russian].
3. Il'chenko, V.Yu. et al. (1993). *Operation of machine-tractor park in agricultural production*. V.Yu. Il'chenko (Ed.). Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
4. Limont, A.S. et al. (2004). *Workshop on machine use in crop production*. I.I. Mel'nyka (Ed.). Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
5. Jakubauskas, V.I. (1973). *Tehnologicheskie osnovy mehanizirovannogo vnesenija udobrenij [Technological bases of mechanized fertilizer application]*. Moskva: Kolos [in Russian].
6. Marchenko, N.M., Lichman, G.I. & Shebalkin, A.E. (1990). *Mehanizacija vnesenija organicheskikh udobrenij (Tehnologicheskie osnovy proektirovanija processov i rabochih organov) [Mechanization of organic fertilizer application (Technological bases of process and working bodies design)]*. Moskva: Agropromizdat [in Russian].
7. Linnik, N.K. et al. (1992). *Machines and equipment for the production and application of organic fertilizers: design and calculation*. L.V. Pogorelogo (Ed.). Kiev: Tjehnika [in Russian].
8. Pavlovskij, I.V. (1965). *Osnovy proektirovanija mashin dlja vnesenija udobrenij v pochvu [Fundamentals of designing machines for fertilizing the soil]*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
9. Ozol, Ja.G. (1965). Vybor optimal'nyh parametrov navozorazbrasyvatelej{ Selection of optimal parameters of manure spreaders}. *Traktory i sel'hoz mashiny – Tractors and agricultural machinery*, 4, 20–22 [in Russian].
10. Fere, N.Je., Bubnov, V.Z., Elenev, A.V. & Pil'shnikov, L.M. (1978). *Posobie po jekspluatácii mashinno-traktornogo parka [Manual for the operation of the machine-tractor fleet]* Moskva: Kolos [in Russian].
11. Perehod'ko, O.Ya. & Yaroschuk, V.A. (1992). Obgruntuvannia ratsional'noi shyryny vnesennia tverdykh orhanichnykh dobryv kuzovnymi rozkydachamy [Substantiation of the rational width of solid organic fertilizers application by body spreaders]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, Vol. 75, 70–74. [in Ukrainian].
12. Zaika, P.M. (2002). *Teoriia sil's'kohospodars'kykh mashyn: mashyny dlja pryhotuvannia i vnesennia dobryv [Theory of agricultural machines: machines for preparation and application of fertilizers]*. Kharkiv: Oho, Vol. 1, Part. 3, 352 [in Ukrainian].
13. Klenin, N.I. & Sakun, V.A. (1980). *Sel'skohozejstvennye i meliorativnye mashiny. Jelementy teorii rabochih processov, raschet regulirovochnykh parametrov i rezhimov raboty [Agricultural and reclamation machines. Elements of the theory of work processes, calculation of control parameters and operating modes]*. Moskva: Kolos [in Russian].
14. Hrechkosij, V.D. ed. al. (1991). *Handbook of rural engineer*. V.D. Hrechkosii (Ed.). Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
15. B. Strautmann, Söhne GmbH & Co. KG. (2018). Prospekty rozkydachiv dobryv kompanii [Brochures of the company's fertilizer spreaders]. KUHN. Katalog tekhniki [in Ukrainian].
16. Poljak, A.Ja. et al. (1983). *Spravochnik po skorostnoj sel'skohozejstvennoj tehnikе [High Speed Agricultural Machinery Handbook]*. Moskva: Kolos [in Russian].
17. Ljahov A.P. et al. (1991). Operation of the machine and tractor fleet. Ju.V. Bud'ko (Ed.). Minsk: Uradzhaj [in Russian].

Anatoliy Limont, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
 Zhytomyr Agrotechnical Collede, Zhytomyr, Ukraine
Zlata Limont, student

Dnipro National University named after Oles Honchar, Dnipro, Ukraine

The Load-carrying Capacity and Power Consumption of Body Machines for Applying Solid Organic Fertilizers

The research is aimed at improving the technological process of applying solid organic fertilizers by means of body machines through determining power consumption and specific power for the drive of the working parts from the power take-off shaft of the tractor and, in general, for the operation of machines depending on their load-carrying capacity. The correlation of the power consumption with load-carrying capacity is taken as the specific power. The research covered body machines produced by the enterprises of the former Soviet Union and by “Strautmann” and “KUHN” companies.

Between the consumption power of machines of different producers and with various load-carrying capacity one can observe the positive correlation link with the correlation coefficient ranging from 0.560 to 0.963 under the correlation ratio amounting from 0.877 to 0.961. Between the specific power of machines and their load-carrying capacity we have revealed the negative correlation link with determined correlation coefficients and correlation ratios.

Depending on the load-carrying capacity of machines produced at the enterprises of the former Soviet Union the change in the gear power of the working parts of the power take-off shaft from the tractor is described by the equation of the advanced incasing power function. The change in the consumption power for the operation of machines produced by “Strautmann” company depending on the loading-capacity of machines is described by the equation of the direct with positive angular coefficient; and for the operation of machines produced by “KUHN” company – by the equation of the accelerated increasing exponent.

The change in the specific power on the gear of the working parts from the tractor power take-off shaft which is produced in the former Soviet Union depending on the load-carrying capacity of machines is described by the equation of the decreasing hyperbola. The change in the specific power in the work of machines produced by “Strautmann” company depending on the load-carrying capacity of machines is described by the equation of the direct with negative value of the angular coefficient.

As concerns the machines produced by “KUHN” company this change is described by the equation of the decreasing hyperbola.

The research results can be used for designing and constructing body machines for spreading solid organic fertilizers, the calculation of the composition and complete equipment of the corresponding machine and tractor units, and the organization of their use in the technological processes of farm crop mechanized production.

body machines for applying solid organic fertilizers, machine producers, load-carrying capacity, consumption power, specific power, equation of regression

Одержано (Received) 11.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

О.М. Васильковський, проф., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.М. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Нестеренко**, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: olexa74@ukr.net

До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора

У статті викладені міркування щодо створення умов для інтенсифікації процесу сепарації зерна за геометричними ознаками. Проведено огляд конструкцій і аналіз роботи відомих решітних поверхонь з позиції можливості забезпечення високих показників технологічної ефективності за рахунок прискорення орієнтації часток відносно отворів решета. Встановлено, що найбільш сприятливі умови орієнтації забезпечують поверхні, утворені повздовжніми елементами малого перерізу обтічної форми, що мінімізують можливість розташування на них часток в положеннях стійкої рівноваги. Виявлено теоретичні можливості збільшення площ живого перерізу та коефіцієнтів живого перерізу решітних полотен, що не мають поперечних перетинків. Наведені залежності сумарної ширини повздовжніх перетинків і коефіцієнта живого перерізу решіт від ширини повздовжніх перетинків для різних решіт. Це дає можливість візуальної оцінки необхідності збільшення живого перерізу решіт шляхом зменшення ширини повздовжніх перетинків, які їх утворюють. Суттєве зменшення ширини перетинків стає можливим завдяки використанню нових матеріалів – плетених шнурів з надвисокомолекулярних поліетиленів типу Spectra/Dyneema, що забезпечують високі показники механічної міцності і зносостійкості при «абсолютній» нерозтяжності.

зерно, зернова суміш, частка, зерноочисна машина, решето, робочі отвори, повздовжні перетинки, просіювальна здатність, ймовірність просіювання, якість очищення, ефективність сепарації, продуктивність, живий переріз, коефіцієнт живого перерізу

А.М. Васильковский, проф., канд. техн. наук, **С.Н. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.Н. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Нестеренко**, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, препод.

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

К созданию концепции «идеального» решета зернового сепаратора

В статье изложены соображения по созданию условий для интенсификации процесса сепарации зерна по геометрическим признакам. Проведен обзор конструкций и анализ работы известных решетных поверхностей с позиции возможности обеспечения высоких показателей технологической эффективности за счет ускорения ориентации частиц относительно отверстий решета. Установлено, что наиболее благоприятные условия ориентации обеспечивают поверхности, образованные продольными элементами малого сечения обтекаемой формы, которые минимизируют возможность расположения на них частиц в положениях устойчивого равновесия. Выявлены теоретические возможности увеличения площади живого сечения и коэффициента живого сечения решетных полотен, которые не имеют поперечных перегородок. Приведены зависимости суммарной ширины продольных перегородок и коэффициента живого сечения решет от ширины продольных перегородок для различных решет. Это дает возможность визуальной оценки необходимости увеличения живого сечения решет путем уменьшения ширины продольных перегородок, которые они образуют. Существенное уменьшение ширины перепонки становится возможным благодаря использованию новых материалов – плетёных шнуров их сверхвысокомолекулярных полиэтиленов типа Spectra/Dyneema, обеспечивающих высокие показатели механической прочности и износостойкости при «абсолютной» нерастяжимости.

зерно, зерновая смесь, частица, зерноочистительная машина, решето, рабочие отверстия, продольные перемычки, просеивающая способность, вероятность просеивания, качество очистки, эффективность сепарации, производительность, живое сечение, коэффициент живого сечения

Постановка проблеми. Якість роботи зерноочисних машин визначається ефективністю виконання технологічних процесів їх основних робочих органів. Сучасні машини оснащені різним набором робочих органів – решетами, системами аспірації, трієрами тощо, які використовуються для забезпечення видалення сторонніх органічних і неорганічних домішок, некондиційного зерна основної культури. На кожному етапі очищення може використовуватися свій набір робочих органів, однак решітне очищення, що дозволяє розділити компоненти зернової суміші за розмірами є універсальною обов'язковою операцією у підготовці зерна до переробки, зберігання, сівби тощо. Таким чином решето являє собою елемент, від параметрів якого у великій мірі залежить продуктивність і якість сепарації. Від режимів роботи решіт також суттєво залежать показники ефективності, однак решето є первинним, базовим елементом системи, який має характеризуватися «ідеальними» показниками для забезпечення максимальної ймовірності просіювання прохідних часток.

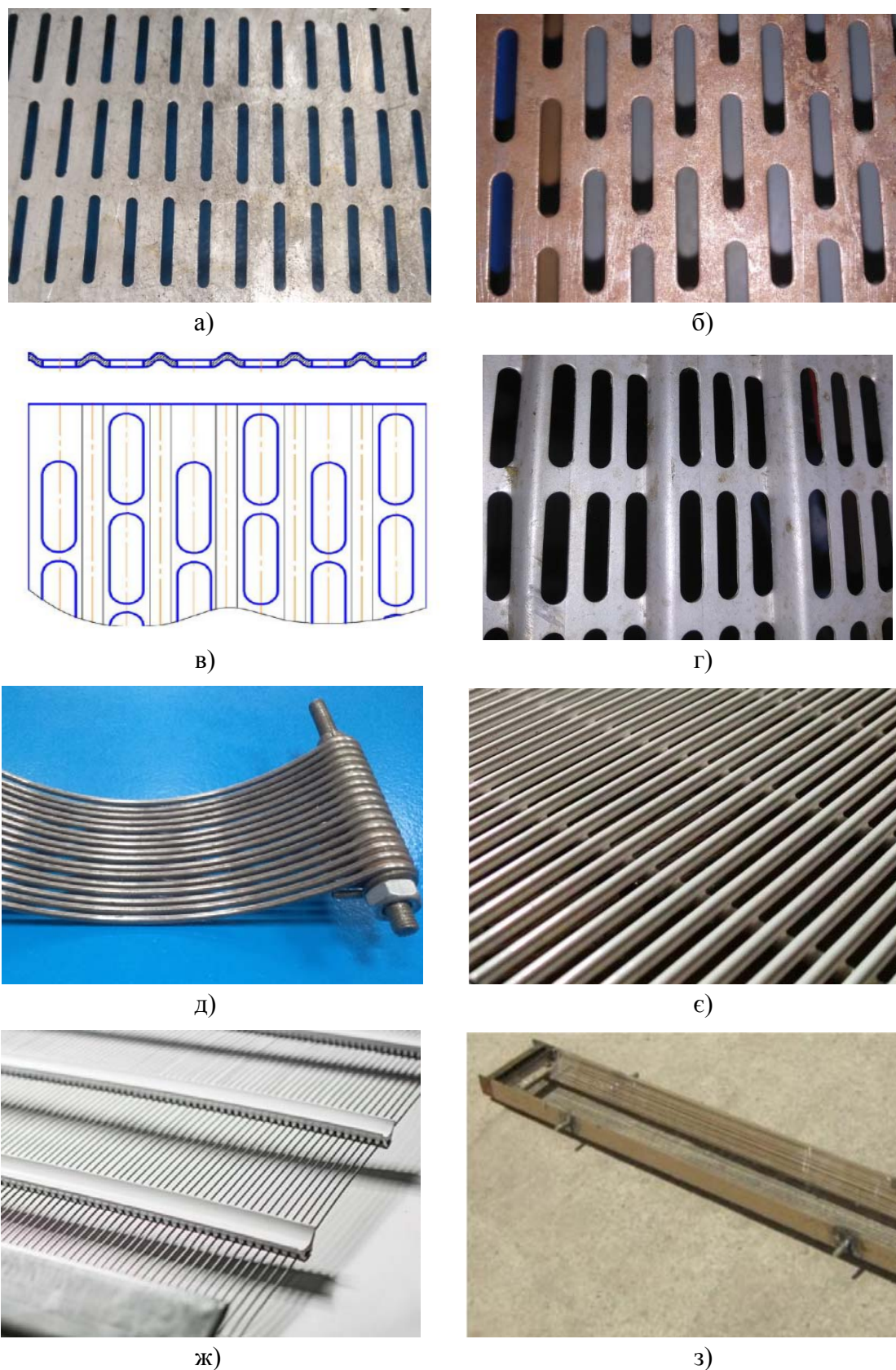
Основними параметрами решіт, що визначають ефективність їх роботи є довжина і ширина, розміри отворів і перетинок, форма решета, перетинок і отворів, положення у просторі і матеріал, з якого решето виготовлено. Таким чином, основою концепції створення «ідеального» решета має стати обґрунтована відповідь на кожне поставлене вище питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зернові решітні сепаратори, попри те, що призначені для виконання лише однієї операції, можуть суттєво відрізнятися за конструктивними особливостями і дією на оброблюваний зерновий матеріал [1-5]. Однак решітні полотна, якими оснащуються зазначені машини мають лише кілька різновидів – плоскі штамповані (рис. 1а,б), профільовані (рис. 1в,г), пруткові (рис. 1д,є) та струнні (рис. 1ж,з).

Плоскі штамповані решітні полотна (рис. 1а,б) використовують у переважній більшості серійних зерноочисних машин, оснащених плоскорешітними нерухомими, коливальними або вібраційними станами [6, 7], а також циліндричними (барабанными) обертальними робочими органами [8]. Вони є найбільш простими і технологічними у виготовленні, легкозамінними і найбільш поширеними з моменту створення решітних сепараторів. Недоліками таких полотен є мала площа живого перерізу і низька орієнтуюча здатність, що не сприяє переміщенню зерна до отворів, а значить не дозволяє інтенсифікувати процес сепарації. Зменшення розмірів перетинок дозволяє позбутися зазначених недоліків, однак це призводить до втрати міцності полотен, особливо тих, що працюють в умовах коливань і вібрацій.

Гофровані решітні полотна (рис. 1в) дозволяють прискорити орієнтацію вздовж робочих отворів і мають вищі показники технологічної ефективності роботи [9,10], однак мають і характерні недоліки – складність виготовлення і очищення отворів від забивань, особливо для вібраційних сепараторів. Решета (рис. 1г) використовують переважно в системах очистки зернозбиральних комбайнів.

Пруткові решітки (рис. 1д,є) являють собою конструктивні рішення, що суттєво інтенсифікують процес сепарації за рахунок наявності повздовжніх перетинок круглого перетину і відсутності поперечних перетинок [11-13]. Повздовжні перетинки круглого профілю суттєво прискорюють орієнтацію часток вздовж отворів, а відсутність поперечних перетинок і гострик крайок знижує ймовірність травмування зерна. Спільним недоліком даних конструкцій є неможливість суттєвого збільшення площі живого перерізу решіт, оскільки зменшення перерізу повздовжніх перетинок – твірних отворів, зменшує їх жорсткість і механічну міцність.



а, б – плоскі пробивні полотна; в, г – профільовані пробивні полотна; д, є – пруткові полотна;
ж, з – струнні решета

Рисунок 1 – Решітні полотна зернових сепараторів

Джерело: розроблено авторами з використанням [1...5]

Струнні решета (рис. 1 ж,з) утворені за рахунок попередньо натягнутих металевих повздожніх елементів – струн малого діаметру (1...2 мм) і мають найбільшу площу живого перерізу з усіх відомих полотен [14-15]. Як і пруткові решітки, вони не мають поперечних перетинок та гострих крайок і є травмобезпечними для оброблюваного матеріалу. Основним недоліком даних решіт є складність забезпечення попереднього натягу струн і підтримання його в процесі роботи, оскільки при великих і нерівномірних навантаженнях, струни можуть зміщуватися у поперечному до напрямку подачі зерна напрямку. При цьому не буде витримано початковий розмір отворів, що погіршить чіткість сепарації.

Постановка завдання. Завданням наших досліджень є формування концепції «ідеального» решета зерноочисної машини, яке дозволило б отримати найвищі показники технологічної ефективності за будь-яких інших рівних умов.

Виклад основного матеріалу. Очевидно, що інтенсивність просіювання часток залежить їх орієнтації – розташування відносно отворів решета. Частка, що знаходиться на повздожній перетинці решітки в положенні стійкої рівноваги має менше ймовірності потрапити до отворів і просіятися, ніж частка, що знаходиться безпосередньо над отвором або у положенні нестійкої рівноваги. Таким чином, інтенсифікувати процес сепарації необхідно шляхом створення умов, при якій частки не матимуть можливості знаходитися у положенні стійкої рівноваги.

Даній вимозі в тій чи іншій мірі відповідають решітні полотна, зображені на рис. 1 в-з.

На показники технологічної ефективності решітної сепарації суттєво впливає площа живого перерізу – сума площ отворів решета A_o , яка в ідеалі має прямувати до площі всього решета A_p .

$$A_o \rightarrow A_p.$$

При цьому, в загальному випадку, коефіцієнт живого перерізу решета має наближатися до 1

$$k_l = \frac{A_o}{A_p} \rightarrow 1.$$

Це стає можливим якщо площа перетинок A_n , що утворюють решето мінімальна:

$$A_n \rightarrow 0.$$

Очевидним є те, що площа живого перерізу буде меншою у решіт, що не мають поперечних перетинок (рис. 1 д,є,з). Для таких решіт наведені вище залежності можна переписати у вигляді

$$b_{o.сум.} \rightarrow B, k_l = \frac{b_{o.сум.}}{B} \rightarrow 1, b_{n.сум.} \rightarrow 0.$$

де $b_{o.сум.}$ – сумарна ширина отворів решета;

B – ширина решета;

$b_{n.сум.}$ – сумарна ширина повздожніх перетинок решета.

З розвитком технологій, забезпечення цієї умови стає реальністю. Сучасні плетені шнури з надвисокомолекулярного поліетилену, наприклад, запатентованої марки Spectra/Dyneema мають високі показники механічної міцності і зносостійкості при малому поперечному перерізі. При цьому такий матеріал характеризується «абсолютною нерозтяжністю». Зокрема, плетений шнур фірми Power Pro при діаметрі 0,28 мм має розривне навантаження 20 кг, а діаметр 0,15 мм є працездатним при навантаженні 9 кг, що у сукупності з нерозтяжністю і зносостійкістю робить їх перспективними для використання у якості повздовжніх перетинок – твірних отворів решіт для забезпечення зазначених вище умов.

Залежності сумарної ширини повздовжніх перетинок і коефіцієнта живого перерізу решета шириною 100 мм від діаметрів повздовжніх перетинок наведено на рис. 2.

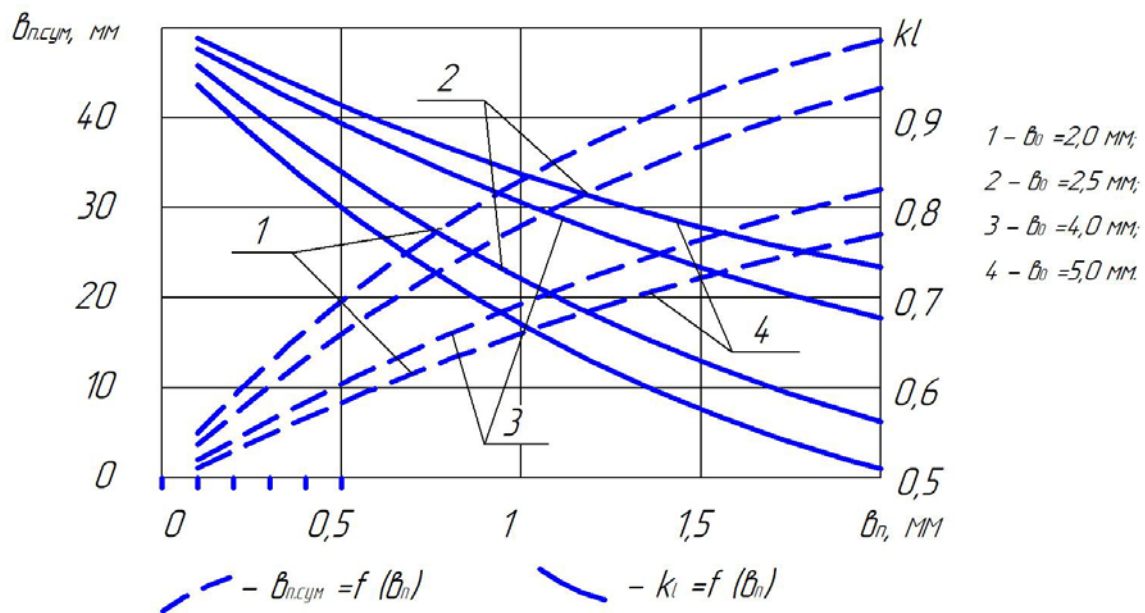


Рисунок 2 – Залежності сумарної ширини повздовжніх перетинок і коефіцієнта живого перерізу решіт шириною 100 мм від діаметрів повздовжніх перетинок для робочих поверхонь з різними розмірами отворів b_0

Джерело: розроблено авторами

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що для підсівних і сортувальних решіт сумарна ширина (а значить і площа) повздовжніх перетинок складає понад 40% поверхні, коли ширина останніх 2 мм. Зменшення ширини перетинок до рівня 0,15 мм збільшує коефіцієнт живого перерізу до рівня 93...99%. При цьому повинна відповідно збільшитися і його пропускна здатність.

Враховуючи те, що зменшення ширини повздовжніх перетинок зменшує ймовірність розміщення часток на останніх в положенні стійкої рівноваги, то в основу створення «ідеальної» конструкції решета повинна стати мінімізація ширини повздовжніх перетинок.

Список літератури

1. Лузан П.Г., Васильковський О.М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 27. С. 123-127.

2. Ермольев Ю.И. Применение гофрированных подсевных решет для очистки зерновых культур. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1984. №6. С. 17-18.
3. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. К.: Урожай, 1990. 194 с.
4. Васильковский М.И. Повышение эффективности сепарации зерна на быстровращающемся цилиндрическом решете. Автореф. дис... канд. техн. наук. Воронеж, 1987. 24с.
5. Завгородний А. И., Монтасер Х. Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей. *Інженерія природокористування*. 2015. Вип. 1(3). С. 34-39.
6. Півень М. В. Обоснование процесса сепарирования зерновых смесей плоскими вибрационными решетками. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin. 2015. Vol.17. №7. С. 163-169.
7. Тищенко Л. Н. та ін. Идентификация скорости прохождения частиц зерновой смеси через отверстия решет вибрационных зерновых сепараторов. Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2016. Вып. 2(7). С. 63-69.
8. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с-г машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 33. С.53-59.
9. Решето Фадеева: пат. 37527 Україна: МПК В07В 1/46 № u200809604; заявл. 22.07.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
10. Минаев В.Н., Регге Х. Пути повышения производительности зерноочистительных машин. *Техника в сельском хозяйстве*. 1990. №1. С.16-17.
11. Мороз С.М., Васильковский М.І., Васильковский О.М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2004. Вип. 14. С. 72-78.
12. Мороз С.М., Васильковский О.М. Експериментальні дослідження впливу параметрів транспортера-сепаратора зерна на показники його роботи. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43 (2). С. 213-219.
13. Мороз С.М., Васильковский О.М., Мачок Ю.В., Анісімов О.В. Вплив основних параметрів роботи транспортера-сепаратора на чіткість очищення зерна. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2018. Вип. № 282. С. 292-303
14. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality / O. Vasylovskiy, K. Vasylovskaya, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk. *INMATEH - Agricultural Engineering – Romania*, Bucharest: INMA. 2019. Vol. 57, No.1. 63-70.
15. Иванов, Н.М. Сепарация зерна на конических решетках с профилированной поверхностью: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1988. 171 с.

Referencis

1. Luzan, P.G. & Vasilkovsky, O.M. (1999). Novi konstrukciyi reshitkovy`x separatoriv [Design, manufacture and operation of agricultural machinery]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, Vol. 27, 123-127. [in Ukrainian].
2. Ermolev, Yu.I. (1984). Primenenie gofrirovannyh podsevyh reshet dlya ochistki zernovykh kultur [The use of corrugated under-sowing sieves for cleaning grain crops]. *Traktory i selskohozyajstvennye mashyny*, 6, 17-18. [in Russian].
3. Komarystov, V.Iu. & Petrenko, M.M. (1990). Dovidnyk z mekhanizatsii pisliazbyralnoi obrobky zerna [Handbook of mechanization of post-harvest processing of grain]. Kyiv: Urozhai. [in Ukrainian].
4. Vasylovskiy, M.I. (1987). Povyishenie effektivnosti separatsii zerna na byistrovrashchayuschemsya tsilindricheskom reshete [Improving the efficiency of grain separation on a rapidly rotating cylindrical sieve]. *Extended abstract of Doctor's theses*. Voronezh [in Russian].
5. Zavorodnyi, A.Y. & Montaser, Kh. (2015). Opredelenie ratsyonalnoi yntensyvnyosti kolebanyi rabochykh orhanov vybroseparatora zernovykh smesei [Determination of rational intensity of oscillations of working organs of vibroseparator of grain mixtures]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannya*, Vol. 1(3), 34-39 [in Russian].
6. Piven, M.V. (2015). Obosnovanye protsessa sepyaryrovaniya zernovykh smesei ploskymy vybratsyonnyimi reshetami [Justification of the process of separation of grain mixtures with flat vibrating sieves]. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin, Vol.17 (7), 163-169 [in Russian].

7. Tyshchenko, L. N. et al. (2016). Ydentyfikatsiya skorosty prokhozhdennya chastyts zernovoi smesy cherez otverstyia reshet vybratsyonnykh zernovykh separatorov [Identification of the rate of passage of particles of the grain mixture through the openings of sieves of vibration grain separators]. *Vostochnoevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, Vol. 2 (7), 63-69 [in Russian].
8. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Pastushenko, M. H. (2003). Tendentsii rozvytku konstrukttsii mashyn ta obladnannia dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv [Trends in the design of machinery and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s-h mashyn*. Kirovohrad, Vol. 33, 53-59 [in Ukrainian].
9. Resheto Fadeieva [Fadeev sieve]: pat. 37527 Ukraina: MPK B07B 1/46 № u200809604; zaiavl. 22.07.2008; opubl. 25.11.2008, Biul. № 22 [in Ukrainian].
10. Minaev, V.N. & Regge, H. (1990). Puti povysheniya proizvoditelnosti zernoochistitelnykh mashin [Ways to increase the productivity of grain cleaning machines]. *Tekhnika v selskom hozyajstve*, №1, 16-17 [in Russian].
11. Moroz, S.M., Vasylovskiy, M.I. & Vasylovskiy, O.M. (2004). Obgruntuvannia diametriv sterzhniv prutkovoho resheta [Determination of the diameters of the rods of the bar sieve]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, Vol. 14, 72-78 [in Ukrainian].
12. Moroz, S.M. & Vasylovskiy, O.M. (2013). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu parametriv transportera- separatora zerna na pokaznyky yoho roboty [Experimental studies of the influence of the parameters of the grain separator on its performance]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsiia silskohospodarskoi tekhniki*, Vol. 43, 2, 213-219 [in Ukrainian].
13. Moroz, S.M., Vasylovskiy, O.M., Machok, Yu.V. & Anisimov, O.V. (2018). Vplyv osnovnykh parametriv roboty transportera-separatora na chitkist ochyshchennia zerna [Influence of the main parameters of the conveyor-separator on the clarity of grain cleaning]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya «Tekhnika ta enerhetyka APK»*, Vol. 282., 292-303 [in Ukrainian].
14. Vasylovskiy, O., Vasylovskaya, K., Moroz, S., Sviren, M. & Storozhyk L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH - Agricultural Engineering – Romania*, Bucharest: INMA, Vol. 57, No.1, 63-70 [in English].
15. Ivanov, N.M. (1988). Separaciya zerna na konicheskikh reshetah s profilirovannoy poverhnostyu [Separation of grain on conical sieves with a profiled surface]: *Candidate's thesis*. Novosibirsk [in Russian].

Olexiy Vasylovskiy, Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Moroz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Nesterenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ludmyla Molokost**, lecturer *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Before Creating the Concept of the «Ideal» Grain Separator Sieve

The article presents considerations for creating conditions for the intensification of the process of grain separation by geometric features.

The review of constructions and the analysis of work of known sieve surfaces from a position of possibility of maintenance of high indicators of technological efficiency at the expense of acceleration of orientation of particles concerning sieve apertures is carried out. It is established that the most favorable orientation conditions are provided by the surfaces formed by longitudinal elements of small cross-section of streamlined shape, which minimize the possibility of placing particles on them in positions of stable equilibrium.

Theoretical possibilities of increasing the living cross-sectional areas and live cross-sectional coefficients of sieve canvases without cross-sections are revealed. The dependences of the total width of the longitudinal sections and the coefficient of the living cross section of the sieves on the width of the longitudinal sections for different sieves are given. This makes it possible to visually assess the need to increase the living cross section of the sieves by reducing the width of the longitudinal sections that form them. A significant reduction in the width of the partitions is possible due to the use of new materials - braided cords made of ultra-high molecular weight polyethylene type Spectra / Dyneema, which provide high mechanical strength and wear resistance with «absolute» inextensibility.

grain, grain mixture, particle, grain cleaning machine, sieve, working holes, longitudinal membranes, sifting capacity, sieving probability, cleaning quality, separation efficiency, productivity, live cross section, live cross section coefficient

Одержано (Received) 04.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 621.928

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.59-68>**І.М. Дударев**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Ольховський**, асп.*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**e-mail: i_dudarev@ukr.net*

Моделювання подачі сипкого матеріалу на решето сепаратора ножичного типу

У статті запропонована конструкція сепаратор сипких матеріалів ножичного типу. Ефективність роботи сепаратора залежить від рівномірності подачі сипкого матеріалу на поверхню решіт. Тому обґрунтування раціональних параметрів сепаратора є надзвичайно актуальним завданням. Запропонована математична модель подачі сипкого матеріалу з бункера на решето дозволяє визначити траєкторію падіння частинки сипкого матеріалу та описати положення решета, що змінюється внаслідок обертання ексцентрика. А це, у свою чергу, дозволяє обґрунтувати раціональні параметри сепаратора з урахуванням кінематичного режиму його роботи. За цих параметрів на решеті буде сформований шар матеріалу однакової висоти, що забезпечить сприятливі умови для процесу сепарування.

сепаратор сипких матеріалів, подача сипкого матеріалу, параметри решета, моделювання завантаження сепаратора, ефективність використання решета

И.Н. Дударев, проф., д-р техн. наук, **В.О. Ольховский**, асп.*Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина*

Моделирование подачи сыпучего материала на решето сепаратора ножничного типа

В статье предложена конструкция сепаратора сыпучих материалов ножничного типа. Эффективность работы сепаратора зависит от равномерности подачи сыпучего материала на поверхность решет. Поэтому обоснование рациональных параметров сепаратора является чрезвычайно актуальной задачей. Предложенная математическая модель подачи сыпучего материала из бункера на решето позволяет определить траекторию падения частицы сыпучего материала и описать положение решета, которое изменяется в результате вращения эксцентрика. А это, в свою очередь, позволяет обосновать рациональные параметры сепаратора с учетом кинематического режима его работы. При этих параметрах на решете будет сформирован слой материала одинаковой высоты, что обеспечит благоприятные условия для процесса сепарации.

сепаратор сыпучих материалов, подача сыпучего материала, параметры решета, моделирование загрузки сепаратора, эффективность использования решета

Постановка проблеми. У сільському господарстві та виробництві комбікормів як посівний матеріал і сировину використовують насіння та зерно різних сільськогосподарських культур, що потребують очищення та сепарування. Ці технологічні операції надзвичайно важливі, оскільки від них залежать якісні показники урожаю, сировини та кінцевого продукту. Сепаратори, що здійснюють очищення та сепарування насіння і зерна (сипких матеріалів), поділяють за способом сепарування на гравітаційні, повітряні, вібраційні, магнітні та інші [1–4]. Принцип роботи переважної більшості сепараторів, які використовуються у сільському господарстві, заснований на поєднанні різних способів сепарування, що передбачають урахування фізико-механічних властивостей складових зернової (насінневої) маси, зокрема, таких як [5]: розмір зерна, маса зерна, форма зерна, текстура поверхні зерна, аеродинамічні характеристики зерна, електропровідність зерна, вологість зерна, фрикційні властивості

зерна тощо. Сепаратори, як і більшість машин та обладнання в сільському господарстві, мають періодичне (сезонне) використання, тому важливо, щоб вони були компактними та транспортабельними. Тоді їх можна переміщати між сільськогосподарськими підприємствами, що збільшить їх завантаження. Такі переваги має сепаратор сипких матеріалів ножичного типу, який внаслідок конструктивних особливостей має невеликі габаритні розміри та зручний в обслуговуванні. Важливим є обґрунтування раціональних параметрів такого сепаратора, зокрема, взаємного розташування бункера і решіт верхніх секцій. Таким чином, дослідження, які спрямовані на обґрунтування конструктивних параметрів сепаратора ножичного типу, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для визначення швидкості потоку сипкого матеріалу у різних частинах бункера під час вивантаження, а також його подачі на робочі поверхні технологічного обладнання, науковці широко використовують метод математичного моделювання. За допомогою цього методу були отримані рівняння для визначення швидкості потоку сипкого матеріалу залежно від форми бункера, його конструктивних параметрів та розмірів вивантажувального отвору [6]. Одним із найбільш поширених методів моделювання, який використовують для визначення швидкості потоку сипких матеріалів на виході із бункерів різної форми, є метод дискретних елементів (DEM) [7].

На процес витікання сипких матеріалів із бункера впливають фізико-механічні властивості матеріалу, температура та відносна вологість зовнішнього середовища, кут нахилу стінок та днища бункера, розмір та форма вивантажувального отвору, матеріал бункера тощо [8]. У випадку нормального витікання швидкість сипкого матеріалу на виході із бункера можна розрахувати за залежністю [9]:

$$V_0 = \mu \sqrt{3,2gR_{\Sigma}} \quad (1)$$

де V_0 – швидкість потоку матеріалу на виході із отвору бункера, м/с;

μ – коефіцієнт витікання ($\mu = 0,55-0,65$);

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

R_{Σ} – гідравлічний радіус вивантажувального отвору, м.

Гідравлічний радіус прямокутного вивантажувального отвору бункера згідно [9]:

$$R_{\Sigma} = \frac{(a - kd_{\text{екв.}})(b - kd_{\text{екв.}})}{2(a + b - 2kd_{\text{екв.}})} \quad (2)$$

де a – ширина вивантажувального отвору бункера, м;

b – довжина вивантажувального отвору бункера, м;

k – емпіричний коефіцієнт ($k = 1,25-1,7$);

$d_{\text{екв.}}$ – діаметр частинки матеріалу або її еквівалентний діаметр, м.

Еквівалентний діаметр частинки сипкого матеріалу визначають згідно [10]:

$$d_{\text{екв.}} = k_{\phi} \xi_{\text{с.г.р.}} \quad (3)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт форми реальної частинки сипкого матеріалу;

$\xi_{\text{с.г.р.}}$ – середній геометричний розмір реальної частинки сипкого матеріалу, м.

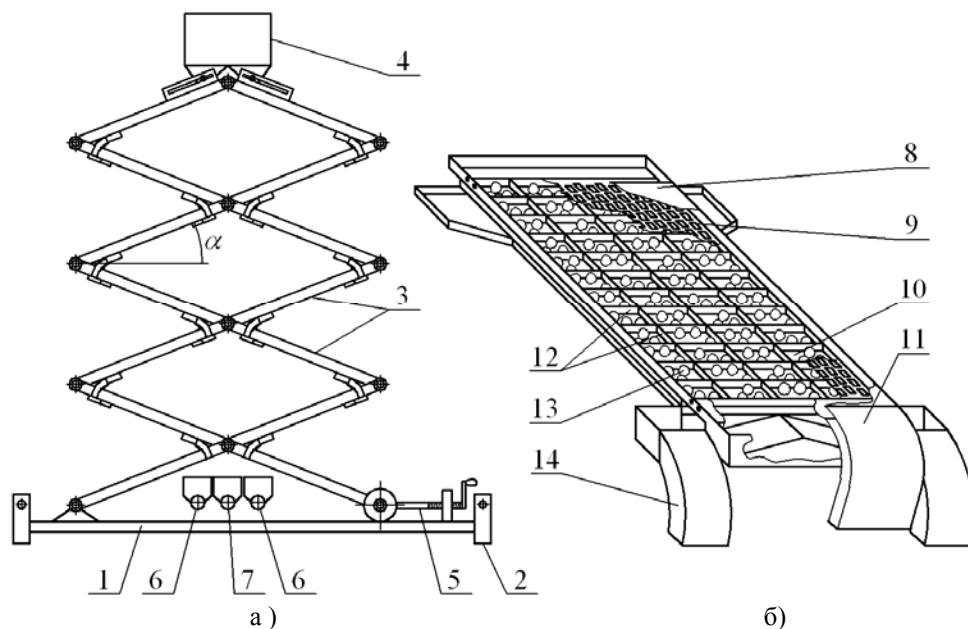
Якщо частинка сипкого матеріалу має сферичну форму, тоді коефіцієнт форми $k_{\phi} = 1$; якщо у формі циліндра – $k_{\phi} = 1,14$; якщо у формі параболічної бочки, тоді значення $k_{\phi} = 0,47$; якщо у формі еліпсоїда – $k_{\phi} = 0,73$ [10].

Від швидкості сипкого матеріалу на виході із бункера залежить дальність польоту частинок сипкого матеріалу та перебіг технологічного процесу сепарування. Тому надзвичайно важливо враховувати цей параметр під час обґрунтування подачі сипкого матеріалу на робочі поверхні технологічного обладнання, зокрема сепаратора.

Постановка завдання. Метою дослідження є змоделювати процес подачі частинок сипкого матеріалу з вивантажувального отвору бункера на похиле плоске решето сепаратора ножичного типу, що здійснює коливний рух.

Виклад основного матеріалу. Для сепарування сипких матеріалів, зокрема насіння та зерна сільськогосподарських культур, пропонується конструкція сепаратора ножичного типу (рис. 1), що містить платформу, на якій розташований механізм сепарування. До платформи нерухомо прикріплені чотири повзунки, які з'єднані за допомогою шатунів із чотирма ексцентриками. Ексцентрики розташовані в чотирьох опорах платформи. В опорах також розташовані вертикальні спрямовувачі для повзунків, чим забезпечена можливість коливного руху платформи з механізмом сепарування вздовж вертикалі.

Механізм сепарування містить систему секцій-важелів трьох різних конструкцій, які з'єднані навхрест (по типу “ножиці”). Над парою верхніх секцій-важелів розташовано бункер із двома вивантажувальними отворами. Секції-важелі обладнані пересипними полицями, кожна з яких містить плоске решето, під яким розташований піддон. Над плоским решетом передбачено кришку, а між плоским решетом і піддоном встановлені поздовжні та поперечні перегородки, які утворюють секції прямокутної форми, в кожній з яких розміщені декілька гумових кульок. Пересипні полиці обладнані рукавами для відокремленої дрібної фракції сипкого матеріалу та для сипкого матеріалу. Рукави усіх пересипних полиць, окрім полиць нижніх секцій-важелів, розташовані таким чином, що спрямовують складові матеріалу на плоскі решета та піддони полиць, які розташовані під ними. Рукави пересипних полиць нижніх секцій-важелів розташовані таким чином, що спрямовують сипкий матеріал у вивантажувальний механізм, а відокремлену дрібну фракцію – в її накопичувачі. Зміна кута встановлення решіт відбувається за допомогою передачі “гвинт-гайка”.



а) – конструкція сепаратора; б) – конструкція пересипної полиці

1 – платформа; 2 – опора; 3 – секції-важелі; 4 – бункер; 5 – передача “гвинт-гайка”; 6 – накопичувачі дрібної фракції; 7 – вивантажувальний механізм; 8 – кришка полиці; 9 – плоске решето; 10 – піддон полиці; 11 – рукав для сипкого матеріалу; 12 – поздовжні та поперечні перегородки; 13 – гумові кульки; 14 – рукави для відокремленої дрібної фракції

Рисунок 1 – Сепаратор сипких матеріалів ножичного типу

Джерело: розроблено авторами

Змодельємо процес подачі сипкого матеріалу на поверхню решета сепаратора ножичного типу. Решета сепаратора здійснюють коливний рух вздовж вертикалі. У коливний рух механізм сепарування приводиться за допомогою чотирьох ексцентриків, які синхронно обертаються в один бік зі сталою кутовою швидкістю ω . Оскільки ексцентрики функціонують однаково, то розглянемо кінематику одного з них. Рівняння переміщення повзунка з початкового положення B_0 , який за допомогою шатуна з'єднаний з ексцентриком, має вигляд (рис. 2, а):

$$y_n = r + l - (r \cos \varphi + l \cos \beta), \quad (4)$$

де y_n – переміщення повзунка вздовж вертикальної осі y , м;

r – радіус ексцентрика ($OA = r$), м;

l – довжина шатуна ($AB = l$), м;

φ – кут повороту ексцентрика, що відраховується від осі y за годинниковою стрілкою, починаючи з крайнього нижнього положення повзунка, град.;

β – кут між шатуном та віссю y , град.

Необхідно зазначити, що у науковій праці [11] представлено аналітичні залежності, що дозволяють визначити точні значення переміщення y_n , швидкості V_n та прискорення a_n механізму приводу в коливний рух повзунка, але ці вирази громіздкі, що ускладнює їх подальше використання під час математичного моделювання технологічних процесів. Також у цій праці визначено похибки використання методу спрощення рівняння (4) за рахунок припущення, що кут β в окремих конструкціях сільськогосподарських машин та обладнання настільки малий, що ним можна знехтувати. За результатами знаходження похибки було встановлено, що її величина є в межах 6–18%, що допустимо не для всіх інженерних розрахунків. Тому скористаємося методом знаходження кута β , який представлений у джерелі [12].

Позначимо r/l через λ , тоді з трикутника ΔABO матимемо (рис. 2, а):

$$\sin \beta = \frac{r}{l} \sin \varphi = \lambda \sin \varphi. \quad (5)$$

Косинус кута β визначається із урахуванням рівняння (5):

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}. \quad (6)$$

Вираз $(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$ є біномом Ньютона, який можна розкласти у ряд [12]:

$$\cos \beta = (1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi - \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \varphi - \dots \quad (7)$$

Ураховуючи можливі значення λ , членами ряду (7), що вищі другого порядку, можна знехтувати, тоді отримаємо:

$$\cos \beta = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi. \quad (8)$$

Після підстановки виразу (8) у рівняння (4), матимемо:

$$y_n = r \left(1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right). \quad (9)$$

Рівняння (9) описує переміщення вздовж вертикалі усіх чотирьох повзунків сепаратора і, відповідно, механізму сепарування з решетами та бункером.

Знайшовши першу та другу похідні від y_n за часом t , ураховуючи, що $\varphi = \omega t$, отримаємо рівняння, відповідно, швидкості та прискорення повзунка [12]:

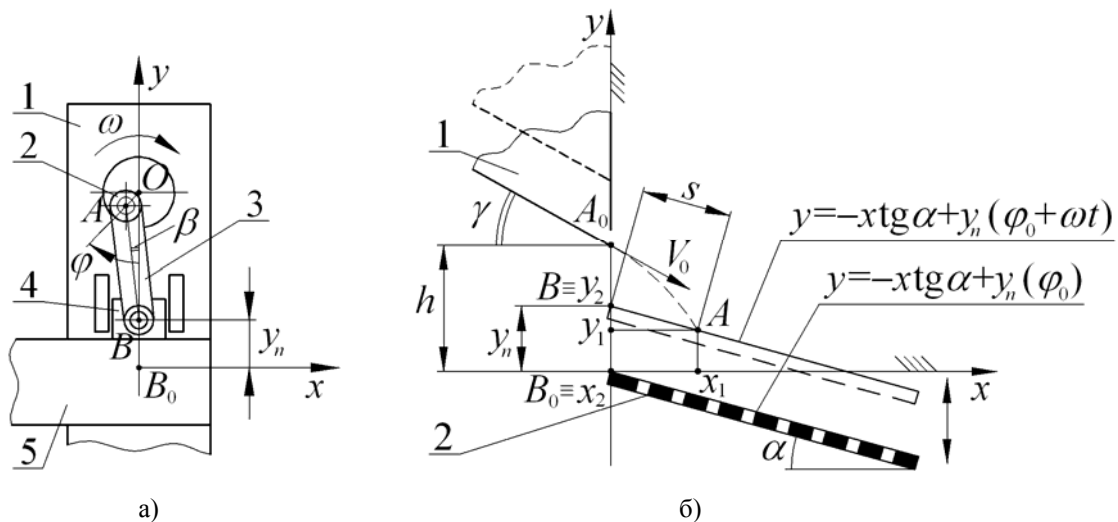
$$V_n = r\omega \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (10)$$

$$a_n = r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \quad (11)$$

де V_n – швидкість повзунка вздовж вертикальної осі y , м/с;

a_n – прискорення повзунка вздовж вертикальної осі y , м/с².

Визначимо дальність польоту частинки сипкого матеріалу вздовж решета, яка виходить з бокового вивантажувального отвору бункера з початковою швидкістю V_0 та здійснює вільне падіння до моменту контакту з поверхнею решета. Нехай, під час падіння на частинку сипкого матеріалу, яку приймаємо за матеріальну точку, діє лише сила ваги mg . Силою опору повітряного потоку переміщенню частинки сипкого матеріалу нехтуємо. Кут між днищем бункера (у площині рис. 2, б) та горизонталлю позначимо через γ , а кут між решетою та горизонталлю – через α . Решето разом із бункером здійснює коливання вздовж вертикалі за законом, що описується рівнянням (9). Початкове положення верхнього краю решета характеризує точка B_0 (рис. 2, б).



а) – схема до визначення кінематичних параметрів ексцентрика (1 – опора платформи; 2 – ексцентрик; 3 – шатун; 4 – повзунк; 5 – платформа сепаратора); б) – схема до визначення координат точки падіння частинки сипкого матеріалу на решето (1 – бункер; 2 – плоске решето)

Рисунок 2 – Розрахункові схеми

Джерело: розроблено авторами

Розташуємо нерухому систему координат xu таким чином, що початок її координат співпадає з початковим положенням (на рис. 2, б – це точка B_0) верхнього краю решета в момент, коли кут повороту ексцентрика $\varphi = 0$. Нехай, у початковий момент часу $t_0 = 0$ ексцентрик знаходиться в положенні, що характеризується кутом φ_0 . При обертанні ексцентрика зі сталою кутовою швидкістю обертання ω , решето за час t переміститься вздовж осі y на відстань y_n , яка визначається за рівнянням (9), в якому $\varphi = \varphi_0 + \omega t$. У цей же час частинка сипкого матеріалу, яка зійшла з днища бункера (на рис. 2, б – початкове положення частинки матеріалу позначене A_0), здійснює вільне падіння до моменту контакту з решетою (на рис. 2, б – це точка A). Вектор швидкості V_0 частинки матеріалу (в момент її сходження з днища бункера) спрямована під кутом γ до горизонталі. Необхідно зазначити, що відстань між верхнім краєм решета та нижнім краєм днища бункера є сталою, оскільки вони розташовані на механізмі сепарування, та

дорівнює h , причому з конструктивних міркувань $h > 2r$. Рівняння, які описують вільне падіння частинки матеріалу в нерухомій системі координат xu , матимуть вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0; \\ m\ddot{y} = -mg, \end{cases} \quad (12)$$

де m – маса частинки сипкого матеріалу, кг;

$\ddot{x}$, $\ddot{y}$ – проекції прискорення частинки сипкого матеріалу на осі x та y , м/с²;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Двічі інтегруючи рівняння (12) за початкових умов $t_0 = 0$, $x_0 = 0$, $y_0 = h + y_n(\varphi_0)$, $\dot{x}_0 = V_0 \cos \gamma$, $\dot{y}_0 = -V_0 \sin \gamma$, отримаємо рівняння для швидкості та переміщення частинки сипкого матеріалу вздовж осей x та y :

$$\begin{cases} \dot{x} = V_0 \cos \gamma; \\ \dot{y} = -gt - V_0 \sin \gamma, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x = V_0 t \cos \gamma; \\ y = -\frac{gt^2}{2} - V_0 t \sin \gamma + h + r \left(1 - \cos \varphi_0 + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_0) \right), \end{cases} \quad (14)$$

де $\dot{x}$, $\dot{y}$ – проекції швидкості частинки сипкого матеріалу на осі x та y , м/с;

x , y – переміщення частинки сипкого матеріалу вздовж відповідних осей, м.

Складемо рівняння, яке описує пряму, що проходить вздовж верхньої поверхні решета (в площині рис. 2, б) незалежно від його положення в системі координат xu :

$$y = -xtg\alpha + r \left(1 - \cos(\varphi_0 + \omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2(\varphi_0 + \omega t))) \right), \quad (15)$$

де x , y – координати прямої по осях x та y , м;

φ_0 – початковий кут повороту ексцентрика (за якого частинка матеріалу розпочинає вільне падіння) у момент часу $t = 0$, град.

Визначимо координати точки падіння частинки сипкого матеріалу на решето в системі координат xu . Для цього складемо систему з рівнянь (14) та (15):

$$\begin{cases} x = V_0 t \cos \gamma; \\ y = -\frac{gt^2}{2} - V_0 t \sin \gamma + h + r \left(1 - \cos \varphi_0 + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_0) \right); \\ y = -xtg\alpha + r \left(1 - \cos(\varphi_0 + \omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2(\varphi_0 + \omega t))) \right). \end{cases} \quad (16)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (16), можна знайти координати точки перетину траєкторії польоту частинки сипкого матеріалу та прямої, яка описує положення верхньої поверхні решета в момент часу t . Тобто знайти координати точки $A(x_1, y_1)$ падіння частинки сипкого матеріалу на решето та тривалість падіння t . За допомогою координат точки $A(x_1, y_1)$ та визначеної за рівнянням (15) координати y_2 точки $B(x_2, y_2)$, що характеризує положення верхнього кінця решета в момент часу t (тобто точки перетину прямої, що описує положення верхньої поверхні решета в момент часу t , з віссю координат y ($x_2 = 0$)). Із урахуванням зазначеного, частинка матеріалу впаде на решето на відстані від його верхнього краю (відстань вимірюється вздовж решета):

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (17)$$

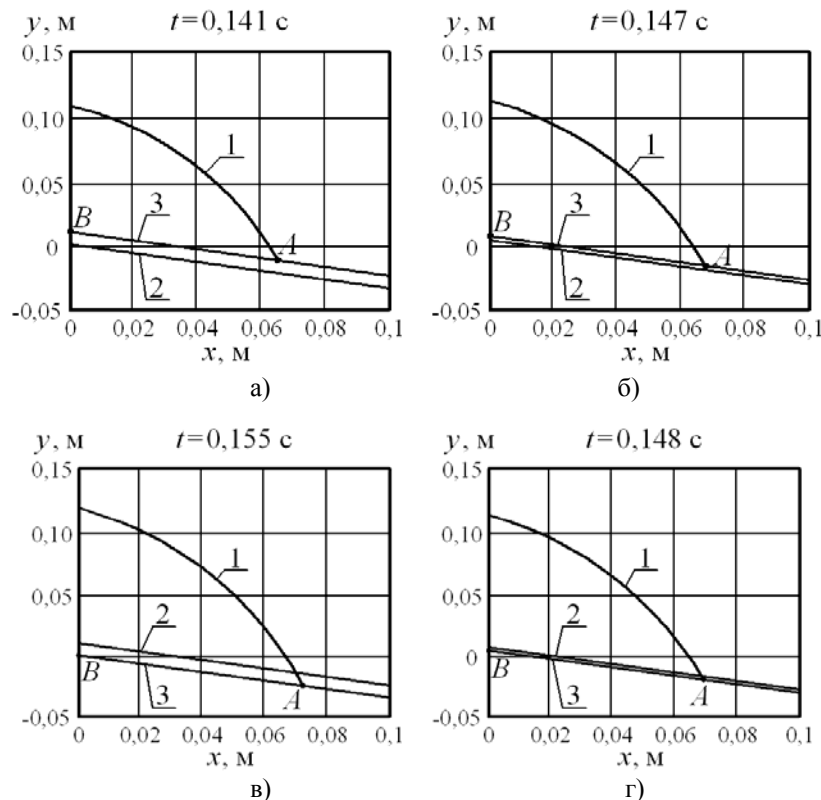
де s – відстань вздовж решета від його верхнього краю до місця падіння частинки сипкого матеріалу на його поверхню, м.

Аналітичний розв'язок рівнянь (16) ускладнений, тому використовуючи систему комп'ютерної математики MathCAD 14 були знайдені розв'язки рівнянь для різних значень кутової швидкості ексцентрика, що представлені в таблиці. Як приклад, за рівняннями (16) побудовані траєкторії падіння частинки матеріалу на решето з бункера при $r = 0,005$ м, $l = 0,1$ м, $\lambda = 0,015$, $\alpha = 18$ град., $\gamma = 20$ град., $h = 0,11$ м, $V_0 = 0,5$ м та $\omega = 20$ рад./с, а також за різних значень початкового кута повороту ексцентрика φ_0 , тобто з якого розпочинається падіння частинки матеріалу (рис. 3). Аналіз даних, які представлені в таблиці, показує, що в досліджуваному діапазоні кутових швидкостей обертання ексцентрика, під час сепарування не використовується від 6,9 см до 7,7 см довжини решета. Крім того, на значення координати (по осі x) падіння частинки матеріалу на решето суттєвий вплив має початковий кут повороту ексцентрика. Значний розкид координат вздовж осі x може зумовити формування на решеті шару сипкого матеріалу із різною висотою, що створить несприятливі умови для процесу сепарування.

Таблиця 1 – Результати моделювання подачі сипкого матеріалу на решето з бункера

Параметри, що визначають умови та результати моделювання			
$\omega = 20$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,141$ с	$t = 0,147$ с	$t = 0,155$ с	$t = 0,148$ с
$\varphi(t) = 2,82$ рад.	$\varphi(t) = 2,94$ рад.	$\varphi(t) = 3,1$ рад.	$\varphi(t) = 2,96$ рад.
$x_1 = 0,066$ м	$x_1 = 0,069$ м	$x_1 = 0,073$ м	$x_1 = 0,07$ м
$y_1 = -0,012$ м	$y_1 = -0,016$ м	$y_1 = -0,024$ м	$y_1 = -0,018$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,0097$ м	$y_2 = 0,0061$ м	$y_2 = 0,000004$ м	$y_2 = 0,0042$ м
$s = 0,069$ м	$s = 0,072$ м	$s = 0,077$ м	$s = 0,073$ м
$\omega = 40$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,148$ с	$t = 0,149$ с	$t = 0,148$ с	$t = 0,147$ с
$\varphi(t) = 5,92$ рад.	$\varphi(t) = 5,96$ рад.	$\varphi(t) = 5,92$ рад.	$\varphi(t) = 5,88$ рад.
$x_1 = 0,069$ м	$x_1 = 0,07$ м	$x_1 = 0,07$ м	$x_1 = 0,069$ м
$y_1 = -0,022$ м	$y_1 = -0,019$ м	$y_1 = -0,013$ м	$y_1 = -0,015$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,001$ м	$y_2 = 0,0031$ м	$y_2 = 0,0099$ м	$y_2 = 0,0068$ м
$s = 0,073$ м	$s = 0,073$ м	$s = 0,074$ м	$s = 0,072$ м
$\omega = 60$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,142$ с	$t = 0,146$ с	$t = 0,155$ с	$t = 0,149$ с
$\varphi(t) = 8,52$ рад.	$\varphi(t) = 8,76$ рад.	$\varphi(t) = 9,3$ рад.	$\varphi(t) = 8,94$ рад.
$x_1 = 0,067$ м	$x_1 = 0,068$ м	$x_1 = 0,073$ м	$x_1 = 0,07$ м
$y_1 = -0,013$ м	$y_1 = -0,014$ м	$y_1 = -0,024$ м	$y_1 = -0,02$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,0079$ м	$y_2 = 0,0079$ м	$y_2 = 0,00004$ м	$y_2 = 0,0025$ м
$s = 0,07$ м	$s = 0,071$ м	$s = 0,077$ м	$s = 0,074$ м

Джерело: розроблено авторами



а) – $\varphi_0 = 0$ рад.; б) – $\varphi_0 = \pi/2$ рад.; в) – $\varphi_0 = \pi$ рад.; г) – $\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.

1 – траєкторія падіння частинки матеріалу; 2 – пряма, що визначає початкове положення решета;
3 – пряма, що визначає положення решета в момент падіння на нього частинки матеріалу

Рисунок 3 – Траєкторія падіння частинки сипкого матеріалу *A* на решето з бункера

Джерело: розроблено авторами

Із досліджених варіантів найменший розкид координат x_1 спостерігається для випадку з $\omega = 40$ рад./с, де x_1 змінюється в межах від 0,069 м до 0,07 м. Тобто частинки матеріалу, не залежно від початкового положення ексцентрика, падають на решето поряд і в цьому випадку шар сипкого матеріалу має однакову висоту на плоскому решеті сепаратора.

Необхідно зауважити, що чим менше значення відстані s , тим ефективніше використовується решето, оскільки частина решета (довжиною s) не використовується для процесу сепарування. Таким чином, у запропонований вище спосіб можна обґрунтувати розташування бункера над решетом, беручи до уваги низку конструктивних та кінематичних параметрів сепаратора.

Висновки. У статті запропонована конструкція сепаратора сипких матеріалів ножичного типу. Крім того, отримана математична модель процесу подачі сипкого матеріалу на решето з бункера, що дозволяє визначити раціональні параметри сепаратора ножичного типу із урахуванням кінематичного режиму його роботи. За цих параметрів буде сформовано шар матеріалу на решеті однакової висоти, що забезпечить сприятливі умови для процесу сепарування. Математична модель також дозволяє визначити раціональні параметри взаємного розташування бункера та решета для того, щоб уся поверхня решета ефективного використовувалася.

Список літератури

1. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov, D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018. Vol. 327. P. 042035.
2. Kugbei S., Avungana M., Hugo W. Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. The FAO of the UN and AfricaSeeds: Rome, 2018.
3. Vasylovskiy O., Vasylovskaya K., Moroz S., Sviren M., Storozhyk L. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57(1). P. 63–70.
4. Basiry M., Esehaghbeygi A. Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture*. 2012. Vol. 28(1). P. 143–147. DOI: 10.13031/2013.41274
5. Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
6. Magalhaes F.G.R., Atman A.P.F., Moreira J.G., Herrmann H.J. Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*. 2016. Vol. 18(33). DOI: 10.1007/s10035-016-0636-y
7. Balevicius R., Kacianauskas R., Mroz Z., Sielamowicz I. Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes. *Advanced Powder Technology*. 2011. Vol. 22. P. 226–235. DOI: 10.1016/j.appt.2010.12.005
8. Савенков Д.Н. Повышение равномерности выгрузки зерновых материалов из бункеров с боковым выпускным отверстием : дисс. ... канд. техн. наук : ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет». Ростов-на-Дону, 2015. 186 с.
9. Зенков Р.Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С. Бункерные устройства. М. : Машиностроение, 1977. 224 с.
10. Богомяких В.А., Несмиян А.Ю. Функционирование бункеров максимального расхода в условиях сводообразующего истечения зерновых материалов : монография. Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО ДГАУ, Зерноград, 2015. 179 с.
11. Гутров М.А. Уравнение движения кривошипно-ползунного привода режущего аппарата жаток с учетом кинематики шатуна. *Достижение науки и техники АПК*. 2010. Вып. 2. С. 66–69.
12. Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие. Владимирский гос. ун-т. Владимир : Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. 124 с.

References

1. Giyevskiy, A.M., Orobinsky, V.I., Tarasenko, A.P., Chernyshov, A.V., & Kurilov D.O. (2018). Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 327, 042035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
2. Kugbei, S., Avungana, M., & Hugo, W. (2018). Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. *The FAO of the UN and AfricaSeeds*. Rome.
3. Vasylovskiy, O., Vasylovskaya, K., Moroz, S., Sviren, M., & Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57(1), 63–70.
4. Basiry, M., & Esehaghbeygi, A. (2012). Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(1), 143–147. <https://doi.org/10.13031/2013.41274>
5. Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., & Selvi K.C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 364–370.
6. Magalhaes, F.G.R., Atman, A.P.F., Moreira, J.G., & Herrmann, H.J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*, 18(33). <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0636-y>
7. Balevicius, R., Kacianauskas, R., Mroz, Z., & Sielamowicz, I. (2011). Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes. *Advanced Powder Technology*, 22, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2010.12.005>
8. Savenkov, D.N. (2015). *Povyshenie ravnomernosti vygruzki zernovykh materialov iz bunkerov s bokovym vypusknyim otverstiem [Improving the uniformity of unloading grain materials from hoppers with a side outlet]*. FGBOU VPO “Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet”, Rostov-na-Donu [in Russian].

9. Zenkov, R.L., Grinevich, G.P., & Isaev, V.S. (1977). *Bunkernye ustrojstva [Hopper devices]*. Mashinostroenie, Moskva [in Russian].
10. Bogomyagkih, V.A., & Nesmiyan, A.Yu. (2015). *Funkcionirovanie bunkerov maksimal'nogo raskhoda v usloviyah svodoobrazuyushchego istecheniya zernovykh materialov [Functioning of maximum flow hoppers under conditions of arch-forming outflow of grain materials: monograph]*. Azovo-CHernomorskiy inzhenernyy institut FGBOU VPO DGAU v g. Zernograde, Zernograd [in Russian].
11. Gutrov, M.A. (2010). *Uravenenie dvizheniya krivoshipno-polzunnogo privoda rezhushchego apparata zhatok s uchetom kinematiki shatuna [The equation of motion of the crank-slider drive of the cutterbar of the headers taking into account the kinematics of the connecting rod]*. Dostizhenie nauki i tekhniki APK, 2, 66-69 [in Russian].
12. Gocz, A.N. (2005). *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mekhanizma porshnevy'kh dvigatelej [Kinematics and dynamics of the crank mechanism of piston engines]*. Vladimirskiy gos. un-t. Vladimir: Redakcionno-izdatel'skiy kompleks VIGU [in Russian].

Igor Dudarev, Prof., DSc., **Vasyl Olkhovskiy**, post-graduate

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Modeling of Bulk Material Loading Into Sieve of the Scissor-type Separator

In agriculture and feed production, seeds and grains of various crops that require cleaning and separation are used as sowing material and raw materials. For seed and grain cleaning and separation the separators of different type are used. During operation, these separators take into account the physical and mechanical properties of the raw material. The article proposes the design of bulk material separator of scissor type, which has small dimensions and is easy to maintain. The efficiency of separator depends on the uniformity of the bulk material loading on the sieve surface. Therefore, substantiation of rational parameters of separator is an extremely important task.

So, the aim of the study is to model the loading process of bulk material from the unloading hole of the hopper on an inclined flat sieve of the scissor-type separator, which performs oscillating motion.

The proposed mathematical model of the bulk material loading from the hopper to the separator sieve allows us to determine the trajectory of the particle falling and to describe the position of the sieve, which changes due to the rotation of the eccentric. Also, modeling allows us to justify the rational parameters of the separator, taking into account the kinematic mode of its operation. Under these parameters, a layer of material of the same height will be formed on the sieve, which will provide favorable conditions for the separation process. In addition, the mathematical model allows us to determine the rational parameters of the relative position of the hopper and the sieve. In this case the entire surface of the sieve is used effectively.

bulk material separator, bulk material loading, sieve parameters, modeling of separator loading, sieve efficiency

Одержано (Received) 25.11.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.555-662.7(048)

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.69-78>

А.Я. Кузьмич, канд. техн. наук, **М.М. Анеляк**, ст. наук. співр., канд. техн. наук,
О.М. Грицака, канд. техн. наук

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» смт. Глеваха, Україна

e-mail: akuzmich75@gmail.com

Збирання незернової частини урожаю соняшнику на енергетичні цілі

Проведено аналіз технологій збирання соняшнику, обґрунтовано спосіб збирання подрібненої маси незернової частини урожаю соняшнику з формуванням валків підвищеної погонної маси на краю поля. Наведено результати лабораторно-польових досліджень збирання, підбору та пресування подрібненої маси незернової частини урожаю соняшнику. Запропоновано конструкційно-технологічну схему причіпного копнувача-валкоутворювача до зернозбирального комбайна для формування валків незернової частини урожаю соняшнику з підвищеною погонною масою.

незернова частина урожаю соняшнику, збирання незернової частини, формування валка

А.Я. Кузьмич, канд.техн.наук, **М.М. Анеляк**, ст. научн. сотр., канд.техн.наук, **А.Н. Грицака** канд. техн. наук

Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» пгт. Глеваха, Украина

Уборка незерновой части урожая подсолнечника на энергетические цели

Проведен анализ технологий уборки подсолнечника, обоснован способ уборки измельченной массы незерновой части урожая подсолнечника с формированием валков повышенной погонной массы на краю поля. Приведены результаты лабораторно-полевых исследований уборки, подбора и прессования измельченной массы незерновой части урожая подсолнечника. Предложена конструкционно-технологическая схема прицепного копнителя-валкообразователя к зерноуборочному комбайну для формирования валков незерновой части урожая подсолнечника с повышенной погонной массой.

незерновая часть урожая подсолнечника, уборка незерновой части, формирование валка

Постановка проблеми. Зменшення світових запасів нафти і газу, а також збільшення затрат на їх видобування і переробку спонукає до пошуку альтернативних джерел енергії. Україна має великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії. Економічно доцільний енергетичний потенціал біомаси в країні складає близько 20-25 млн т у.п./рік при загальному споживанні первинної енергії в розмірі 175 млн т у.п./рік [1].

Основними складовими потенціалу є побічна продукція сільськогосподарського виробництва рослинного походження, зокрема незернова частина урожаю кукурудзи і соняшнику. Одним із найбільш вагомих аргументів на користь використання цих культур на енергетичні цілі є посівні площі вирощування кукурудзи і соняшнику в Україні. Згідно даних Держкомстату площі вирощування соняшнику в Україні в 2020 році становили близько 6,4 млн га, що в структурі посівних площ складає 21,1%. За наявних посівних площ цих культур в Україні, із врахуванням науково обґрунтованої частки (30–40%) рослинних решток, яку можна використати для виробництва енергії, потенціал використання на енергетичні цілі незернової частини урожаю соняшнику складає до 8 млн т.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами наукових праць [2–5] встановлено можливі об'єми збирання НЧУ соняшнику. Інша група наукових праць присвячена аналізу можливих варіантів використання НЧУ соняшнику при виробництві альтернативних палив (біогаз, біодизель, тверді види палив тощо), вони також визначають економічну ефективність цих способів отримання енергії [6–9].

Важливим є питання визначення властивостей НЧУ соняшнику як палива та порівняння його теплотворної здатності, хімічного складу з традиційними видами палива. Результати досліджень з цього напрямку наведено у працях [1, 2, 4, 6, 8].

Відомі дослідження з аналізу технологій збирання НЧУ ранніх зернових в розсипному та пресованому вигляді [9], в яких розкриваються переваги та недоліки цих способів. Слід відмітити, що збирання НЧУ в рулони, переробка її для отримання брикетів та гранул потребує подрібнення сировини, тому вона може зберігатися як у розсипному, так і в ущільненому стані.

Для збирання НЧУ соняшнику переважно використовуються технічні засоби для збирання кормів та зерна.

Аналіз останніх досліджень дозволяє стверджувати, що на сучасному етапі відсутні науково обгрунтовані технологічні процеси збирання та ефективні технічні засоби, що здатні забезпечувати отримання якісної сировини з НЧУ в необхідній кількості [10].

Аналіз технологій та технічних засобів, які використовуються і або можуть бути використані для збирання не зернової частини врожаю кукурудзи і соняшнику мають суттєві обмеження при їх використанні на збирані незернової частини врожаю цих культур на енергетичні цілі.

Тому виникає необхідність проведення досліджень з пошуку шляхів підвищення енергетичної ефективності процесу збирання та обгрунтування енергоефективних технологій і технічних засобів для збирання НЧУ кукурудзи та соняшнику на енергетичні цілі.

Постановка завдання. Підвищення ефективності збирання незернової частини урожаю соняшнику на енергетичні цілі шляхом розробки технології та обгрунтування технічних засобів.

Виклад основного матеріалу. Вибір раціональної технології збирання НЧУ соняшнику на енергетичні цілі визначається біологічними особливостями та технологіями збирання основної продукції – насіння.

Соняшник збирають зернозбиральними комбайнами, обладнаними спеціальними адаптерами. Адаптер для збирання соняшнику або ж зернова жниварка з відповідним пристосуванням скошує кошики з частиною стебла та подає їх на обмолот в молотарку зернозбирального комбайна. Обмолочені кошики збираються в причіп або ж розкидаються по поверхні поля. Нижня частина стебла залишається стояти на пні. Висоту зрізу стебел встановлюють з урахуванням висоти розміщення кошиків пониклих рослин соняшнику [12].

Існує 2 способи збирання НЧУ – розсипному та ущільненому вигляді. Заготівля стеблової маси в ущільненому вигляді (рулони, паки) для енергетичних потреб є доцільнішою ніж у розсипному вигляді. Ущільнення НЧУ в тюки суттєво покращує ефективність логістики та скорочує витрати на неї. Слід також зазначити, що прес-підбирачі повинні бути пристосовані для тюкування стебел соняшнику з огляду на більші розміри фракції і міцність речовини порівняно із сіном, соломом зернових колосових, ріпаку й сої.

Важливими аспектами, які необхідно враховувати при збиранні НЧУ на енергетичні цілі, є вологість матеріалу та строки збирання. Соняшник за своєю біологічною особливістю досягає нерівномірно. Збирання соняшнику розпочинають у вересні при побурінні 75-80% кошиків. При збиранні культури в оптимальній фазі стиглості вологість кошиків та стебел становить 45-55%. Це унеможливило зберігання зібраної маси без попереднього досушування. Крім того збирання подрібненої листостеблової маси без її ущільнення суттєво підвищує енергетичні витрати на транспортувальні роботи.

Накопичення маси насіння соняшника та олії завершується через 35-40 днів після масового цвітіння. Надалі йде фізичне випаровування води та настає господарська стиглість. Передзбиральне підсушування рослин соняшнику за допомогою хімічних речовин (десикація) у фазі фізіологічної стиглості прискорює дозрівання й підсушування насіння та незернової частини урожаю, дає змогу на 8-12 днів раніше розпочати збирання.

При виборі технології збирання НЧУ соняшнику слід враховувати місце даних культур в сівозміні. У регіонах, де присутня велика кількість вологи соняшник вважається досить не поганим попередником для озимої пшениці, а також для інших озимих зернових. Оскільки строки збирання соняшнику та посіву озимих часто збігаються в часі, це вимагає швидкого звільнення поля для підготовки ґрунту до посіву.

Збирання рослинної сировини, яка може бути використана на енергетичні цілі передбачає формування з неї рулонів для полегшення наступного транспортування та використання, зберігання чи переробки. Прес-підбирачі є високопродуктивними машинами тому (працюючи на підбиранні маси) валок повинен мати погонну масу понад 4 кг/м. При незначній погонній масі буде зростати частка втраченої сировини. Особливо значні втрати можуть виникати при підбиранні такої сировини як стебла соняшнику.

Перспективним виглядає спосіб збирання НЧУ соняшнику, що полягає в збиранні подрібненої маси, яка пройшла через молотарку зернозбирального комбайна, в причіпний копнувач і формуванні валків із підвищеною погонною масою на краю поля для досушування маси та наступному підбиранні їх серійними прес-підбирачами.

Для визначення ефективності запропонованого способу збирання НЧУ соняшнику були проведені лабораторно-польові дослідження. Для збирання подрібненої маси НЧУ соняшнику було підготовлено агрегат в складі зернозбирального комбайна «Дон-1500» та модернізованого зразка причіпного копнувача до зернозбирального комбайна (рис. 1). Для роботи агрегату були виготовлені елементи універсального пристосування ПКН-1500 та причіпного пристрою. Лабораторно-польові дослідження проводили за таких умов: врожайність насіння соняшнику – 30 ц/га; вологість насіння – 8,6%, вологість верхньої частини стебла та кошика – 24-30%, висота стеблостою – 1,6-1,8 м, висота скошування стебел – 0,9-1,0 м.



Рисунок 1 – Збиральний агрегат в складі комбайна «Дон-1500А» та модернізованого зразка причіпного копнувача

Джерело: розроблено авторами

Під час проведення досліджень фіксували час роботи збирального агрегату, пройдену відстань, зібрану площу та об'єм подрібненої маси НЧУ, що надійшла в камеру причіпного копнувача висоту скошування стебел, були відібрані зразки рослин для визначення вологості та біологічної врожайності. Також були відібрані зразки матеріалу за довжиною камери та проведений аналіз їх фракційного складу та фізико-механічних властивостей.

За результатами досліджень встановлено, що за рівня врожайності насіння соняшнику в межах 30 ц/га обсяг збирання зернозбиральним комбайном подрібненої маси НЧУ складав 7,5-8,5 ц/га.

Із зібраної за допомогою збирального агрегату подрібненої маси НЧУ соняшнику були сформовані валки шириною 1 м та висотою від 0,1 м до 0,5 м (погонною масою до 25 кг/м). Підбирання валків та формування рулонів проводили за допомогою прес-підбирача ПРФ-145 в агрегаті з трактором МТЗ-80 (рис. 2).



Рисунок 2 – Підбирання валків подрібненої маси НЧУ соняшнику

Джерело: розроблено авторами

В результаті проведення лабораторно-польових досліджень отримані залежності впливу параметрів валка, на повноту підбирання подрібненої маси НЧУ соняшнику прес-підбирачем (рис. 3).

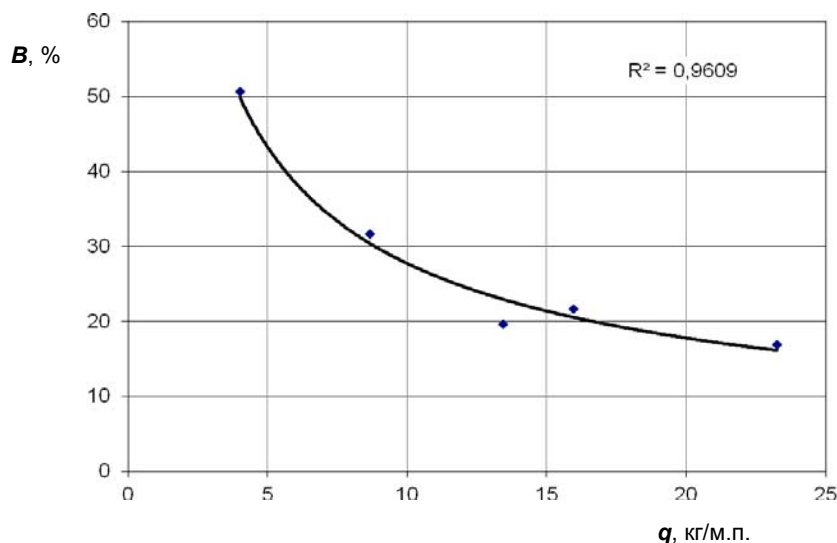


Рисунок 3 – Залежність впливу маси погонного метра сформованого валка подрібненої маси НЧУ соняшнику на втрати за прес-підбирачем

Джерело: розроблено авторами

Наведена залежність свідчить, що значення втрат подрібненої маси НЧУ соняшнику за прес-підбирачем зменшується зі збільшенням ваги погонного метра сформованого валка. При значеннях маси погонного метра валка понад 17 кг/м.п., що відповідає висоті валка 400 мм та більше, втрати подрібненої маси за прес-підбирачем не перевищують 20%.

Результати лабораторно-польових досліджень засвідчили цілісність сформованих рулонів з подрібненої маси НЧУ соняшнику (рис. 4). що насамперед було забезпечено наявністю довгих волокнистих частин стебел.



Рисунок 4 – Сформовані рулони з подрібненої маси НЧУ соняшнику

Джерело: розроблено авторами

Дослідження гранулометричного складу подрібненої маси НЧУ соняшнику, зібраної зернозбиральним комбайном, засвідчили наявність ній понад 18% часток довжиною понад 150 мм (рис. 5).

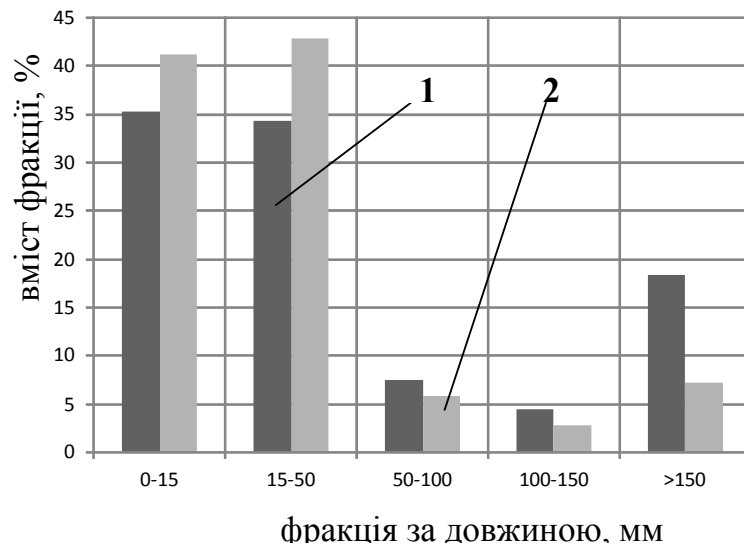


Рисунок 5 – Фракційний склад подрібненої маси НЧУ соняшнику у валку (1)
та у втратах за прес-підбирачем ПРФ-145 (2)

Джерело: розроблено авторами

Слід відмітити, що в матеріалі, який залишився незібраним після проходу прес-підбирача збільшився вміст «дрібних» фракцій 0-15 мм та 15-50 мм з 34-35% до 41-43%. Однією з причин цього було просипання «дрібних» часток крізь технологічні отвори та нещільності робочої камери прес-підбирача.

Крім того було відмічено яскраво виражений процес фракціонування компонентів НЧУ в ємності причіпного копнувача за довжиною, в наслідок відмінності їх аеродинамічних властивостей. Це стало причиною значної нерівномірності фракційного складу подрібненої маси НЧУ за довжиною камери причіпного копнувача. Так в першій третині камери копнувача вміст часток довжиною понад 150 мм становив 28,4%, а часток довжиною до 15 мм – 17,3%. Натомість в останній третині камери копнувача вміст часток довжиною понад 150 мм зменшився до 7,2%, а часток довжиною до 15 мм зріс до 41,2%.

Наступним етапом були проведені дослідження зміни вологості подрібненої маси НЧУ соняшнику. Дослідження проводили шляхом відбору та визначення вологості зразків технологічного матеріалу. Вимірювання вологості зразків НЧУ кукурудзи та соняшнику, проводили термогравіметричним методом – висушуванням до постійної маси [13]. Зразки стебел подрібнювали, відбирали пробу та висушували за температури 105 ± 2 °C в сушильній шафі. Валки подрібненої маси були сформовані 11 жовтня 2019 р. Через 4 доби були відібрані зразки матеріалів з валків. Після їх аналізу було встановлено, що в верхньому шарі валка товщиною 100 мм вологість маси зменшилася з 26–28% до 16%. В нижньому шарі валка, що контактував з ґрунтом вологість залишилась незмінною.

Встановлено, що за рівня врожайності насіння соняшнику в межах 30 ц/га обсяг збирання зернозбиральним комбайном подрібненої маси НЧУ складає 7,5-8,5 ц/га. При підбиранні прес-підбирачем було сформовано рулони з щільністю 75-90 кг/м³ при середній вологості маси 23%. Повнота підбирання валка складала 65-80%.

Отже, результати лабораторно-польових досліджень підтвердили гіпотезу щодо доцільності підбирання валків подрібненої маси НЧУ соняшнику з погонною масою понад 20 кг/м.п. за рівня втрат, що не перевищує 20 %. Суттєвого зменшення рівня втрат подрібненої маси НЧУ соняшнику за прес-підбирачем можна досягти за рахунок

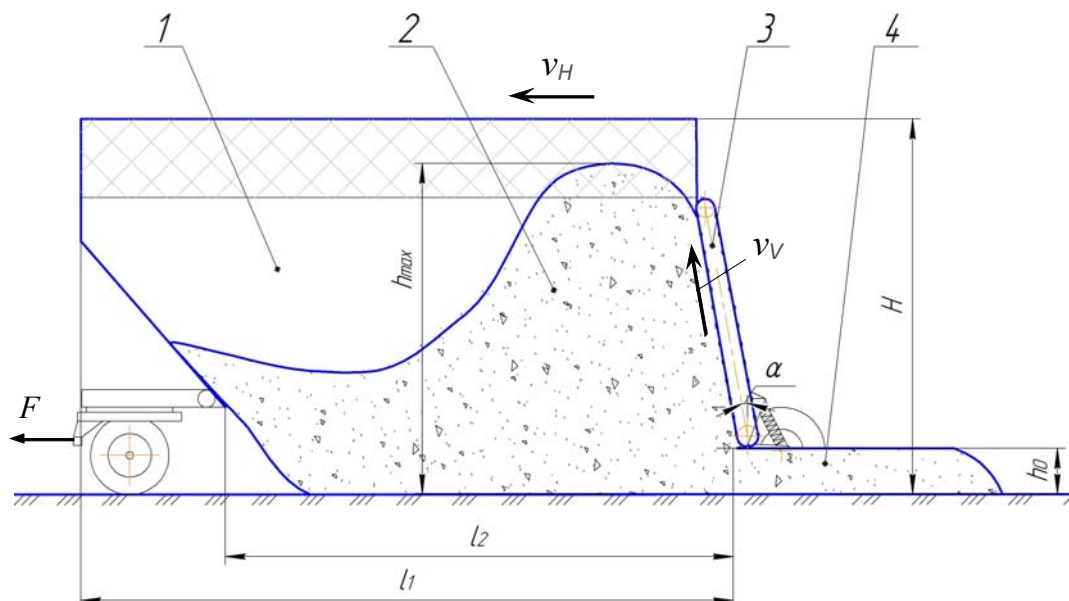
вдосконалення його конструкції: ущільнення камери пресування, встановлення бічних подільників, зменшення відстані між пальцями підбирача, встановлення притискного вальця над барабанним пальцевим підбирачем.

За результатами проведених експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей подрібненої маси НЧУ соняшника було встановлено, що вміст у ній часток із довжиною понад 100 мм у кількості лише 20% призводить до зростання питомого зчеплення між частинками за вологості маси в межах 20–22% удвічі: із 170–175 Па до 350–90 Па, що унеможливило зсув технологічної маси методом розтягування маси по поверхні поля пасивними робочими органами під дією власної ваги.

Отже, формування валка подрібненої маси НЧУ кукурудзи та соняшнику з підвищеною погонною масою можливе причіпним копнувачем, активними робочими органами.

За результатами лабораторно-польових досліджень процесів збирання подрібненої маси НЧУ соняшнику запропоновано конструкційно-технологічну схему причіпного копнувача-валкоутворювача до зернозбирального комбайна (рис. 6).

Використання причіпного копнувача-валкоутворювача до зернозбирального комбайна забезпечить збирання подрібненої маси НЧУ соняшнику формування валків із підвищеною погонною масою на краю поля для досушування та наступного підбирання їх серійними прес-підбирачами. При цьому основна частина поля відразу звільняється для обробки ґрунту під наступні культури.



1 – причіпний копнувач; 2 – подрібнена маса НЧУ; 3 – відкидний транспортер, 4 – валок НЧУ

Рисунок 6 – Технологічна схема формування валка НЧУ причіпним копнувачем з активними робочими органами

Джерело: розроблено авторами

Виконання ємності у вигляді швидкокорозвантажувального копнувача із днищем, що відкривається під дією ваги зібраної маси дозволить здійснювати вивантаження НЧУ без зупинки комбайна, не зменшуючи продуктивності зернозбирального комбайна. При цьому очікується формування валків НЧУ з погонною масою в межах 16–20 кг/м.

Висновки. 1. Ефективність збирання НЧУ соняшнику на енергетичні цілі можна підвищити завдяки збору подрібненої маси, що пройшла через молотарку зернозбирального комбайна, в причіпний копнувач і формування валків із підвищеною

погонною масою на краю поля для досушування та наступного підбирання їх серійними прес-підбирачами.

2. Результати лабораторно-польових досліджень підтвердили гіпотезу щодо можливості підбирання валків подрібненої маси НЧУ соняшнику з погонною масою понад 20 кг/м.п. за рівня втрат, що не перевищує 20 %. Суттєвого зменшення рівня втрат подрібненої маси НЧУ соняшнику за прес-підбирачем можна досягти за рахунок вдосконалення його конструкції: ущільнення камери пресування, встановлення бічних подільників, зменшення відстані між пальцями підбирача, встановлення притискного вальця над барабанним пальцевим підбирачем.

3. Встановлено, що за рівня врожайності насіння соняшнику в межах 30 ц/га обсяг збирання зернозбиральним комбайном подрібненої маси НЧУ складає 7,5-8,5 ц/га. При підбиранні прес-підбирачем було сформовано рулони з щільністю 75-90 кг/м³ при середній вологості маси 23%. Повнота підбирання валка складала 65-80%.

4. Для реалізації технології збирання незернової частини урожаю соняшнику із формуванням і підбором “потужних” валків подрібненої маси розроблено конструкційно-технологічну схему причіпного копнувача-валкоутворювача до зернозбирального комбайна, обладнаного відкидним транспортером. При цьому очікується формування валків з погонною масою в межах 16–20 кг/м.

Список літератури

1. Гальчинська Ю.М. Оцінка потенціалу біомаси побічної продукції сільськогосподарських культур в аграрному секторі економіки. *Економіка АПК*. 2019. № 5. С. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201905015>
2. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Трибой О. В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. *Аналітична записка БАУ*. 2014. № 10. 33 с.
3. Голуб Г. А. Проблеми техніко-технологічного забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2011. Вип. 7. С. 59–66.
4. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив : монографія / Б. Я. Блюм та ін. Київ : Аграр Медіа Груп. 2014. 360 с.
5. Monforti, F., Bodis, K., Scarlat, N., Dallemand, J.-F. The possible contribution of agricultural crop residues to renewable energy targets in Europe: A spatially explicit study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 19. P. 666–677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.060>
6. Soybean Straw, Corn Stover and Sunflower Stalk as Possible Substrates for Biogas Production in Croatia: A Review. / Đ. Kovačić et al. *Chemical and Biochemical Engineering*. 2017. Q. 31.(3) P. 187–198. DOI: 10.15255/CABEQ.2016.
7. Напрями розвитку альтернативних джерел енергії: Акцент на твердому біопаливі та гнучких технологіях його виготовлення : монографія / О. С. Полянський та ін. : за ред. В. І. Д'яконова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 36 с.
8. Зубко В. М., Соколік С. П. Аналіз технологій та технічних засобів для використання відходів виробництва соняшнику в якості біопалива. *Інженерія природокористування*. 2017. № 1 (7). С. 6–10.
9. Гайденок О. М. Технологічний процес заготівлі та використання рослинної біомаси як твердого біопалива : монографія. Київ : Аграрна наука, 2017. 144 с.
10. Аспекти процесів збирання незернової частини врожаю кукурудзи та соняшнику як твердого біопалива / В. В. Адамчук та ін. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 9 (108). С. 10–20. DOI:10.37204/0131-2189-2019-9-1
11. Калетнік Г. М. Біопаливо. *Продовольча, енергетична та економічна безпека України : монографія*. Київ : Хай-Тек Прес, 2010. 516 с.
12. Кириченко В. В., Тимчук В. М., Святченко С. І. Енергетична оцінка виробництва соняшнику. *Науково-технічний бюлетень інституту олійних культур НААН*. 2014. № 21. С. 54–171.
13. Крищенко В.П. *Методы оценки качества растительной продукции*. Москва : Колос, 1983. 192 с.

14. Sheychenko, V.O., Kuzmych, A. Ya., Shevchuk, M.V., Shevchuk, V.V., Belovod, O.I. Research of quality indicators of wheat seeds separated by pre-threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p157-164. 8p.
15. Rogovskii I., Stepanenko S., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O. Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. Vol. 12 (61), No. 1. 2019. p. 117–128.

References

1. Halchynska, Yu.M. (2019). Otsinka potentsialu biomasy pobichnoi produktsii silskohospodarskykh kultur v aharnomu sektori ekonomiky [Development of biomass potential of by-products of agricultural crops in the agrarian sector of economy]. *Ekonomika APK – The Economy of Agro-Industrial Complex*, 5, 15–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201905015>
2. Geletukha, G.G., Zhelezna, T.A., & Tryboy, O.V. (2014). Perspektyvy vyroshchuvannya ta vykorystannia enerhetychnykh kultur v Ukraini. [In Perspectives of Growing and Using Energy Cultures in Ukraine]. *Analitichna zapyska BAU – Analytical note of BAU*, 10 [in Ukrainian].
3. Golub, G. A. (2011). Problemy tekhniko-tekhnologichnoho zabezpechennia enerhetychnoi avtonomnosti ahroekosystem [Problems of techno-technological provision of energy autonomy of agro-ecosystems]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of Vinnitsa National Agrarian University. Series Technical Sciences*, 7, 59–66 [in Ukrainian].
4. Blume, Ya.B., Grygoryuk, I.P., Dmytruk, K.V., Dubrovin, V.A., Yemets, A.I., & Kaletnik, G.M., et al. (2014). *Systema vykorystannia bioresursiv u novitnikh biotekhnolohiiakh otrymannia alternatyvnykh palyv : monohrafiia [The system of using bioresources in the latest biotechnologies for obtaining alternative fuels : monograph]*. Kyiv : Agrar Media Group [in Ukrainian].
5. Monforti, F., Bodis, K., Scarlat, N., & Dallemand, J.-F. (2013). The possible contribution of agricultural crop residues to renewable energy targets in Europe: A spatially explicit study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 666–677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.060>
6. Kovačić, Đurđica & Tišma, Marina. (2017). Soybean Straw, Corn Stover and Sunflower Stalk as Possible Substrates for Biogas Production in Croatia: A Review. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 31. 187-198. DOI: 10.15255/CABEQ.2016.985.
7. Polianskyi, O.S., Diakonov, O.V., & Skrypnyk O.S. et al. (2017). *Napriamy rozvytku alternatyvnykh dzherel enerhii: Aktsent na tverdomu biopalyvi ta hnuchkykh tekhnolohiiakh yoho vyhotovlennia : monohrafiia [Areas of development of alternative energy sources: Focus on solid biofuels and flexible technologies for its production : monograph]*. V. I. Dyakonov (Ed). Kharkiv : KhNUMG.
8. Zubko, V.M., & Sokolik, S.P. (2017). Analiz tekhnolohii ta tekhnichnykh zasobiv dlia vykorystannia vidkhodiv vyrobnytstva soniashnyku v yakosti biopalyva [Analysis of technologies and technical means for the use of sunflower seed waste as biofuel]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia – Environmental Engineering*, 1 (7), 6–10 [in Ukrainian].
9. Gaidenko, O. M. (2017). *Tekhnologichniy protses zahotivli ta vykorystannia roslynnoi biomasy yak tverdoho biopalyva : monohrafiia [Technological process of harvesting and use of plant biomass as solid biofuel.: monograph]*. Kyiv : Agrarian Science [in Ukrainian].
10. Adamchuk, V.V., Kuzmenko, V.F., Kuzmych, A.Y., & Maksimenko, V.V. (2019). Aspekty procesiv zbyrannya nezernovoyi chastyiny vrozhayu kukurudzy ta sonyashnyku yak tverdogo biopalyva [Aspects of non-grain part harvesting for corn and sunflower as solid biofuels]. *Mexanizaciya ta elektrifikaciya silskogo gospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, 9 (108), 10–20. DOI:10.37204/0131-2189-2019-9-1 [in Ukrainian].
11. Kaletnik, G.M. (2010). *Biopalyvo. Prodovolcha, energetychna ta ekonomichna bezpeka Ukrayiny : monografiya [Biofuels. Food, energy and economic security of Ukraine : monograph]*. Kyiv : Hi-Tech Press. [in Ukrainian].
12. Kyrychenko, V.V., Tymchuk, V.M., & Sviatchenko, S.I. (2014). Energetychna ocinka vyrobnytstva sonyashnyku [Energy evaluation of sunflower production]. *Naukovo-texnichnyy byuleten instytutu oliynykh kultur NAAN – Scientific and technical bulletin of the Institute of Oilseeds NAAS*, 21, 54–171. [in Ukrainian].
13. Krishhenko, V.P. (1983). *Metody ocenki kachestva rastitelnoj produkcii [Methods for assessing the quality of plant products]*. Moscow: Kolos [in Russian].
14. Sheychenko, V.O., Kuzmych, A. Ya., Shevchuk, M.V., Shevchuk, V.V., Belovod, O.I. Research of quality indicators of wheat seeds separated by pre-threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p157-164. 8p. [in English].

15. Rogovskii I., Stepanenko S., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O. Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. Vol. 12 (61), No. 1. 2019. p. 117–128.

Alvian Kuzmych, PhD tech. sci., **Mykhailo Aneliak**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Oleksandr Hrytsaka**, PhD tech. sci.,

National Scientific Centre "Institute of Agricultural Engineering and Electrification" Glevakha, Ukraine

Collection of Non-grain Part of Sunflower Harvest for Energy Purposes

The aim of the research is to increase the efficiency of harvesting the non-grain part of the sunflower crop for energy purposes by developing technology and substantiation of technical means.

The analysis of sunflower harvesting technologies is carried out; the method of harvesting the crushed mass of the non-grain part of the sunflower crop with the formation of windrows of high linear mass at the edge of the field is substantiated. The results of laboratory field research of harvesting, selection and pressing of the crushed mass of the non-grain part of the sunflower crop are presented. Directions of improvement of the baler for harvesting of a non-grain part of sunflower harvest are noted. The constructional-technological scheme of the trailed hopper and windrow-former to the combine harvester for formation of windrows of a non-grain part of a crop of sunflower with the increased running weight is offered. The results of laboratory field studies confirmed the hypothesis of the possibility of selecting the rolls of the crushed mass of the non-grain part of the sunflower crop with a running weight of more than 20 kg per meter at a level of losses not exceeding 20%. The efficiency of harvesting the non-grain part of the sunflower crop for energy purposes can be increased by collecting the crushed mass passed through the combine harvester in a trailed digger and forming rolls with high running weight at the edge of the field for drying and subsequent selection by serial balers. It is established that at the level of yield of sunflower seeds within 3 ton per ha the volume of harvesting by the combine harvester of the crushed weight of non-grain part makes 7.5-8.5 center per ha. When picking with a baler, rolls with a density of 75-90 kg per m³ were formed at an average humidity of 23%.

non-grain part of sunflower harvest, harvesting of non-grain part, windrow formation

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 621.928.13

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.78-87>

М.В. Півень, доц., канд. техн. наук

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, м. Харків, Україна

e-mail: m.v.piven@gmail.com

Експериментальні дослідження розподілу питомого завантаження суміші по площі нахилоного лотка

В роботі досліджено закономірності розподілу питомого завантаження плоского нахилоного лотка. Центральна ділянка лотка є перевантажена, а пристінкові недовантажені. Найбільші відхилення питомого завантаження на вході лотка, але з довжиною вони зменшуються. Профіль питомого завантаження по ширині лотка є несиметричним і має локальний екстремум. З довжиною лотка питома завантаження зменшується. Нерівномірне завантаження лотка виникає внаслідок нерівномірної подачі матеріалу із бункера.

лоток, сипка суміш, питома завантаження поверхні, нерівномірна подача суміші

М.В. Пивень, доц., канд. техн. наук

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, г. Харьков, Украина

Экспериментальные исследования распределения удельной загрузки смеси по площади наклонного лотка

В работе исследованы закономерности распределения удельной загрузки плоского наклонного лотка. Центральный участок лотка является перегруженным, а пристеночные недогруженными. Наибольшие отклонения удельной загрузки на входе лотка, но с длиной они уменьшаются. Профиль удельной загрузки по ширине лотка является несимметричным и имеет локальный экстремум. С длиной лотка удельная загрузка уменьшается. Неравномерная загрузка лотка возникает вследствие неравномерной подачи материала из бункера.

лоток, сыпучая смесь, удельная загрузка поверхности, неравномерная подача смеси

Постановка проблеми. Завантаження робочої поверхні похилого лотка є важливою складовою технологічних процесів розділення, сушіння, транспортування та інших. Вказані процеси дуже чутливі до зміни завантаження. Наявність ділянок перевантаження приводить до зростання товщини шару і ущільнення суміші, а наявність ділянок недовантаження приводить до зменшення заповнення лотка сумішшю, а отже до зменшення ступеню використання площі робочої поверхні. В обох випадках відбувається зниження ефективності виконання технологічного процесу.

В дослідженнях процесів обробки сипких сумішей приймалися припущення, що рух суміші є стаціонарним потоком зі сталою швидкістю по довжині лотка [1-4]. Поперечні складові швидкості прирівнювались до нуля, вплив бокових стінок не враховувався, потік вважався однорідним за густиною та товщиною шару. Початкова швидкість приймалась сталою по ширині лотка та в часі. Закономірності руху суміші досліджувались тільки в поздовжній площині потоку і приймалися однаковими на всій площі лотка.

Такі умови передбачають рівномірне завантаження суміші по площі робочої поверхні лотка. Однак, нерівномірна подача суміші на вході лотка, неоднорідність властивостей суміші, дія сил опору та інше обумовлюють зміну завантаження робочої поверхні. Тому, виникає необхідність дослідити розподіл завантаження суміші по площі лотка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для моделювання руху сипкої суміші застосовуються рівняння руху в'язкої рідини. В основу цього покладена аналогія в поведінці в'язкої рідини і сипкої суміші в умовах швидких рухів. Досліджуючи гідродинамічні характеристики псевдозріджених сипких середовищ в роботі [5] встановлено, що при збільшенні коефіцієнта динамічної в'язкості завантаженість робочої поверхні зменшується. Це обумовлено погіршенням рухливості сипкої суміші та зростанням товщини шару. В деяких випадках можлива повна зупинка потоку суміші. Але в роботі досліджені закономірності руху в повздовжньому перетині потоку та не встановлені зміни в поперечному перетині.

Дослідження закономірностей гравітаційного руху сипких середовищ по вібрлотку виконано в роботі [6]. Визначений вплив параметрів вібрацій та кута нахилу лотка на процес його завантаження. Встановлено, що оптимальне завантаження має місце при великих амплітудах і низьких частотах коливань. Вплив віброприскорення на зростання завантаження є суттєвим тільки на низьких частотах коливань. Зі збільшенням кута нахилу лотка величина завантаження зменшується. Розподіл завантаження по площі лотка та вплив початкової подачі на вході в роботу не досліджено.

Рух сипкої суміші визначається не тільки фізико-механічними властивостями середовища та конструктивно-кінематичними параметрами лотка, але в значній мірі

залежить від початкових умов руху. На процес завантаження лотка впливають подавально-дозуючі пристрої. В роботі [7, 8] для визначення початкових умов руху розглянуто процес переміщення матеріалу від дозатора до шару, з подоланням опору повітряного простору. Однак, переміщенням частинок суміші в поперечному напрямі знехтувано, а рух шару змодельовано рухом плоскої частинки. Такі спрощення не дають змоги дослідити розподіл завантаження по площі робочої поверхні, обмежуючи параметри руху усередненими значеннями. Крім того, джерелом руху сипкої суміші є накопичувальний бункер, який започатковує характер руху на наступних пристроях.

В роботі [9] з вивчення нестійкого руху зерна по вібраційному решету встановлено, що на початку робочої поверхні, де зернова суміш надходить з певною початковою швидкістю, характер відносного руху частинок є нестійким. В зоні завантаження решета частинки суміші рухаються по складних криволінійних траєкторіях зміщуючись в поперечному перерізі решета, що безпосередньо впливає на рівномірність розподілу зерна по периметру робочої поверхні. Утворюється перевантаження решета на одних ділянках і недовантаження на інших, що погіршує ефективність технологічного процесу. Але в роботі рух зернового шару змодельовано рухом матеріальної точки, що вносить значні похибки в дослідження процесу завантаження робочої поверхні.

Швидкість руху суміші визначає величину завантаження робочої поверхні. Характер змінювання швидкості по робочій поверхні обумовлює відповідну зміну завантаження її площі. В роботі [10] досліджено змінювання швидкості потоку суміші по довжині решета при гармонічних пульсаціях початкової швидкості на вході решета, яка обумовлює нерівномірність подачі. Встановлено, що при нерівномірній подачі суміші на решето довжина області нерівномірного руху менше довжини робочої поверхні решета, але зі зменшенням частоти і збільшенням амплітуди коливань подачі суміші, довжина області нерівномірного руху зростає. Однак змінювання початкової швидкості по ширині решета в роботі не розглянуто.

Аналіз робіт свідчить, що розподіл завантаження потоку сипкої суміші змінюється і потребує уточнених досліджень. Залишились не визначеними розподіли завантаження по ширині та довжині робочої поверхні лотка, не враховано витік суміші з накопичувального бункера, початкової ланки, де розпочинається рух і утворюється характер початкової подачі. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність процесу обумовлює необхідність проведення дослідження завантаження площі робочої поверхні похилого лотка.

Постановка завдання. Встановити закономірності розподілу питомого завантаження сипкою сумішшю по площі робочої поверхні нахилого лотка.

Виклад основного матеріалу. Вивчення закономірностей процесу завантаження виконано експериментальним способом, який дозволяє відтворити реальний фізичний процес. Дослідження процесу завантаження похилого лотка проведено на експериментальній установці (рис.1, 2). Вона складається з металевого каркасу 1 на якому встановлений накопичувальний бункер 2 з випускним прямокутним отвором, довжина якого дорівнює ширині бункера. Ступінь відкриття випускного отвору регулюється заслінкою 3. Під накопичувальним бункером встановлені два похилі лотки, один під одним так, що суміш з верхнього лотка 4 зсипається на нижній 5. Лотки виконані прямокутної форми з боковими стінками перпендикулярними до площини робочої поверхні. Біля виходу з нижнього лотка встановлений приймальний пристрій 6 у формі паралелепіпеда з прямокутною основою, довжина якого дорівнює ширині лотка. Простір всередині приймального пристрою розділений на тридцять окремих комірок, розташованих трьома ярусами по висоті, по десять комірок в кожному ярусі.

Експериментальна установка працює наступним чином. При відкритті заслінки, сипка суміш з накопичувального бункера потрапляє через випускний отвір на похилий лоток, розподіляється по його поверхні та рухається в напрямку схилу. Далі суміш потрапляє на нижній лоток, переміщується по його поверхні та сходить в приймальний пристрій. Першими заповнюються комірки нижнього ярусу, потім середнього і верхнього. Яруси відділяються один від одного заслінками 7 (рис.1), які одночасно закривають або відкривають разом всі комірки одного ярусу. Заслінки нижнього ярусу 8 відкривають та закривають кожну комірку окремо. Установка передбачає регулювання ступеня відкриття випускного отвору накопичувального бункера, кута нахилу лотків до горизонту та заміну лотків різної довжини. Для проведення дослідів використовувалась зернова суміш озимої пшениці сорту «Миронівська 30», вологістю 10-15%, масою 1000 насінин 39,2 г. Ширина лотка 1 м, довжина варіювалась в межах 0,1- 2,2 м, кут нахилу до горизонту 18° , матеріал поверхні лотка оцинкована сталь.

Програмою експериментальних досліджень передбачалось визначення величини завантаження похилого лотка. Розрізняють завантаження початкове – вага матеріалу, що проходить через вхідний поперечний перетин лотка за одиницю часу, та місцеве – вага матеріалу, що проходить через довільний поперечний перетин лотка за одиницю часу [11]. Для дослідження розподілу завантаження по площі робочої поверхні лотка необхідно визначити питомих місцеве завантаження – вагу матеріалу, що проходить через одиницю ширини поперечного перетину лотка за одиницю часу:

$$q_i = \frac{m_i}{t_i}, \quad (1)$$

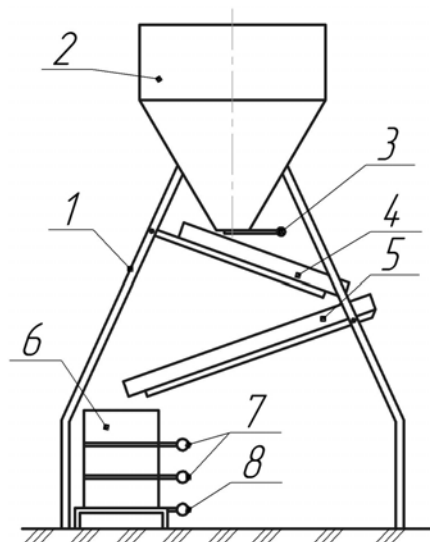
де q_i – питомих місцеве завантаження, кг/год·дм;

m_i – вага матеріалу, що проходить через одиничну ділянку ширини, кг/дм;

t_i – час, год.

Величина місцевого питомого завантаження визначалась за допомогою приймального пристрою. Вимірювались вага матеріалу в окремій комірці та час її наповнення. Розподіл матеріалу по комірках визначав розподіл місцевого завантаження по ширині лотка. Розподіл матеріалу по ярусах комірок визначав розподіл місцевого завантаження по ширині лотка з плином часу. Для визначення розподілу місцевого питомого завантаження на різній довжині від вхідного перетину використовувались лотки різної довжини при сталих інших параметрах.

Тривалість дослідів вимірювалась електронним секундоміром KD-6128 KADIO, з похибкою не більше 0,1 секунди. Вагу матеріалу вимірювали на вагах Matarix з похибкою 1 грам. Кут нахилу лотків вимірювався універсальним кутоміром УН-127. Обробка результатів експериментальних досліджень виконувалась із застосуванням методів математичної статистики. Після кожної серії дослідів визначались оцінки випадкових величин: $\bar{X}$ – середньоарифметичне; σ – середньоквадратичне відхилення; σ^2 – дисперсія; V – коефіцієнт варіації. Довірча імовірність вимірюваних величин задавалась з рівнем $\alpha = 0,95$ при граничній похибці $\varepsilon_{zp} = \pm 2\sigma$, що дає необхідну кількість повторювань дослідів рівну чотирьом. Аналіз експериментальних даних виконувався при дотриманні однорідності дисперсій обумовлених помилками дослідів, для всієї серії вимірювань. Умова однорідності означає однаковий вплив помилок і випадкових завод для кожної серії вимірювань. Перевірка однорідності дисперсій проводилась за допомогою статистичного критерія Кохрена.



1 – каркас; 2 – накопичувальний бункер; 3 – заслінка; 4 – верхній лоток; 5 – нижній лоток;
6 – приймальний пристрій; 7 – заслінки верхнього та середнього ярусів; 8 – заслінки нижнього ярусу

Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Загальний вид експериментальної установки з приймальним пристроєм

Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 представлені залежності початкового питомого завантаження на вході лотка по його ширині. Форма профілю питомого завантаження утворюється при висипанні сипкої суміші із накопичувального бункера, в якому започатковується рух. Суміш висипається із бункера нерівномірно по ширині. Витрата матеріалу в центральній частині бункера більша ніж біля бокових стінок. Існує незначна різниця у кількості висипаного матеріалу між лівою і правою пристінковими ділянками, що породжує несиметричність профілю питомого завантаження по ширині. Причому, більш інтенсивне розвантаження бункера можливо як з лівої так і з правої частини.

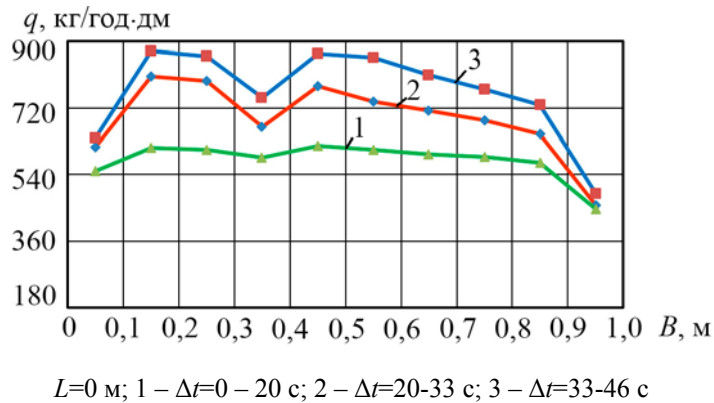


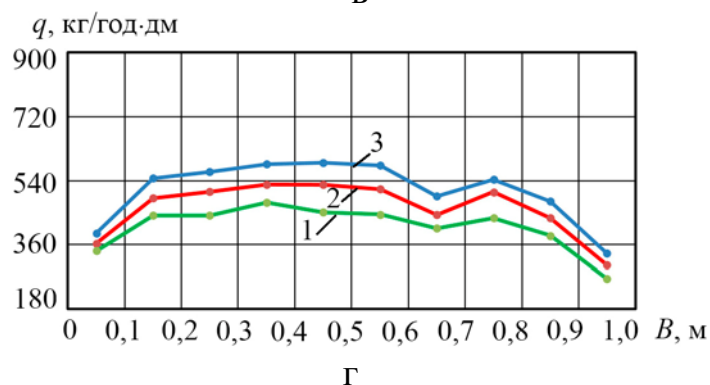
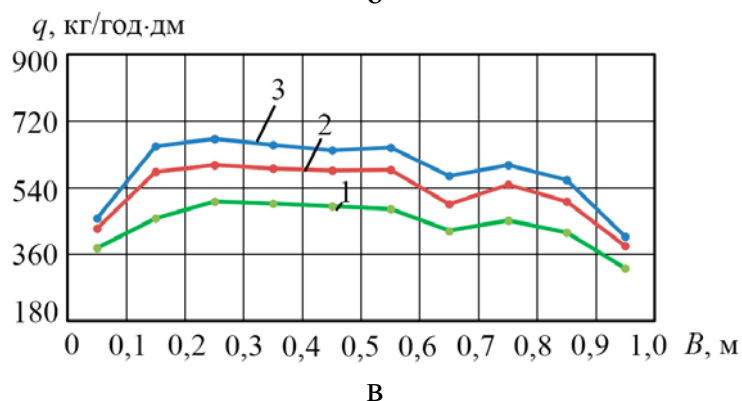
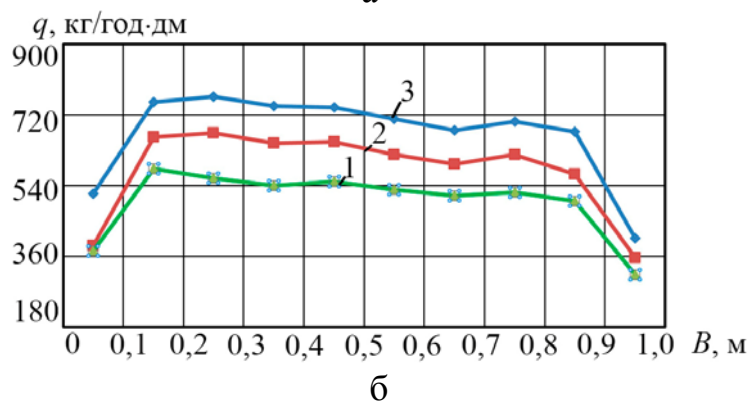
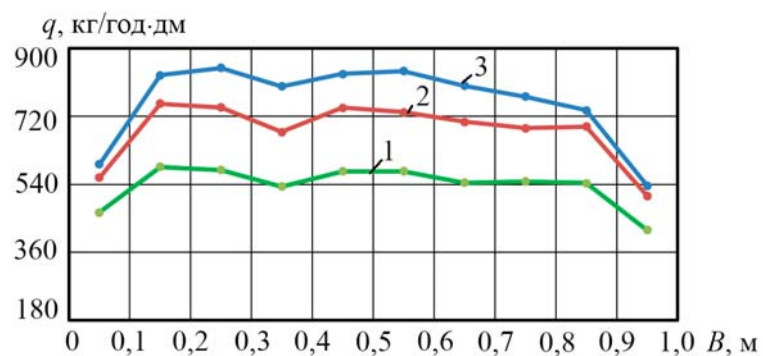
Рисунок 3 – Профіль початкового питомого завантаження по ширині лотка

Джерело: розроблено авторами

Графічні залежності питомого завантаження на вході лотка (рис. 3 криві 1, 2, 3) одержані для трьох інтервалів часу: 1 – $\Delta t=0-20$ с; 2 – $\Delta t=20-33$ с; 3 – $\Delta t=33-46$ с, тому характеризують середнє значення питомого завантаження для кожного окремого інтервалу. Однак в кожному наступному інтервалі часу питоме завантаження на вході лотка змінюється. Воно зростає з плином часу і збільшується величина відхилень від середнього значення завантаження. Такий характер зміни завантаження визначається відповідною витратою матеріалу із бункера. В початковий момент часу, коли накопичувальний бункер повністю заповнений, суміш знаходиться в умовах стиснення боковими стінками, і процес висипання ускладнений. По мірі випорожнення бункера рівень суміші падає, вплив стінок зменшується і швидкість висипання зростає.

В центральній частині бункера, на вузькій ділянці ширини, зміщений до однієї бокової стінки, має місце локальний екстремум функції питомого завантаження – найменше значення в околі даної ділянки ширини (рис.3 криві 2, 3). Причому, в початковий проміжок часу $\Delta t=0-20$ с (рис. 3 крива 1), такий екстремум відсутній. Це вказує на утворення склепіння в бункері в даному перетині. Утворення склепіння можливе як з лівої, так і з правої сторони бункера (рис. 3 і рис. 4 в, г) і залежить від багатьох випадкових факторів. Розташування локального екстремуму на іншій ділянці ширини (рис. 4 в, г) пояснюється тим, що вимірювання у довільному поперечному перетині виконувалось незалежно від інших перетинів. Отже, початкове питоме завантаження на вході лотка є нерівномірним по ширині, змінюється в часі і визначається характером висипання матеріалу із накопичувального бункера.

На рис. 4 а, б, в, г представлені залежності місцевого питомого завантаження лотка по його ширині на різній довжині від вхідного перетину. Форма профілю початкового питомого завантаження, утвореного при витіканні суміші із бункера, зберігається майже на всій довжині лотка. Центральна по ширині лотка ділянка перевантажена, а пристінкові ділянки недовантажені. Зберігається несиметричність профілю питомого завантаження по ширині лотка та наявність локального екстремуму (рис. 4, 5). Відбувається зміна величини завантаження з плином часу. Однак, відхилення від середнього значення питомого завантаження зменшуються з довжиною і розподіл суміші по площі робочої поверхні лотка стає більш рівномірним. Утворення рівномірного розподілу вказує на появу переміщення суміші з перевантаженої центральної ділянки до недовантажених пристінкових ділянок лотка.



1 – $\Delta t=0-20$ с; 2 – $\Delta t=20-33$ с; 3 – $\Delta t=33-46$ с;

а – $L=0,8$ м; б – $L=1,2$ м; в – $L=1,6$ м; г – $L=2,2$ м

Рисунок 4 – Профілі місцевого питомого завантаження по ширині лотка

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 5 – Приймальний пристрій з розподіленою по коміркам сумішшю
Джерело: розроблено авторами

Довжина лотка також впливає на процес завантаження робочої поверхні. Зі збільшенням довжини питоме завантаження зменшується за величиною (рис. 4 а, б, в, г). Відбувається зменшення швидкості суміші та уповільнення потоку. Звичайно, такий режим руху має місце при куті нахилу 18° та певній початковій швидкості, величина якої залежить від характеру висипання із бункера та умов потрапляння на робочу поверхню лотка. Отже, режим руху є нестационарним, що при сталій подачі суміші із бункера, приводить до поступового накопичення суміші в лотку, ущільнення та зростання шару і до повної зупинки потоку. При збільшенні кута нахилу швидкість руху потоку зростає, товщина та щільність шару зменшуються і величина питомого завантаження залишається сталою. Але рух потоку стає прискореним, отже нестационарним.

Таким чином, рух потоку суміші у нахиленому лотку є нестационарним, питоме завантаження суттєво змінюється на всій площі робочої поверхні і в значній мірі залежить від початкових умов руху, які визначаються характером подачі матеріалу із накопичувального бункера. Одержані закономірності питомого завантаження по площі робочої поверхні лотка можуть бути використані при розрахунку режимів руху сипких сумішей та обґрунтуванні параметрів обладнання для завантаження робочих органів машин.

Висновки:

1. Питоме завантаження лотка є нерівномірним по площі робочої поверхні: центральна ділянка перевантажена, а пристінкові недовантажені. Найбільші відхилення питомого завантаження на вході лотка, але з довжиною вони зменшуються, наближаючись до рівномірного розподілу. Профіль питомого завантаження по ширині лотка є несиметричним і має локальний екстремум. Зі збільшенням довжини лотка, при певній початковій швидкості та куті нахилу, питоме завантаження зменшується і потік суміші сповільнюється.

2. Нерівномірне завантаження лотка виникає внаслідок нерівномірної подачі матеріалу із накопичувального бункера, в якому започатковується рух. Початкова подача змінюється по ширині лотка і з плином часу, а характер профілю питомого завантаження, утворений на вході в лоток, зберігається майже на всій його довжині.

Список літератури

1. Півень М.В. Обоснование процесса сепарирования зерновых смесей плоскими вибрационными решетками. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin*. 2015. Vol.17 №.7. 163–169.

2. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2. № 7 (80). 63–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920
3. Kharchenko S., Kovalishin S., Zavgorodniy A., Kharchenko F., Mikhaylov Y. Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58. № 2. 17–26. DOI: 10.35633/INMATEH-58-02
4. Akhmadiev F., Gizzyatov R., Kiyamov K. Mathematical modeling of thin layer separation of granular materials on sieve classifiers. *Theoretical foundations of chemical engineering*. 2013. Vol. 47. No 3. 254–261. DOI.org/10.1134/S0040579513030019
5. Тищенко Л. Н. Гидродинамические характеристики псевдооживленных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв. Вісник ХДТУСГ*. 2001. Вип.5. 13–33.
6. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г. Вибрационные машины и технологии для переработки гранулированных сред. 2011. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии. 296 с.
7. Бредихін В.В. Механіко-математична модель руху зернових сумішей у вібропневмоцентрифугах. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2001. Вип. 85. 116–119.
8. Бредихін В.В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих сумішей за густиною насіння. Дис. ...канд. техн. наук: 05.05.11 / ХДТУСГ. Харків. 2003. 246 с.
9. Гончаров Е. С. Теория неустойчивого движения зерна по поверхности вертикальных цилиндрических центробежновибрационных решет. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1973. Вып.25. 39–44.
10. Тищенко Л. Н., Ольшанський С. В., Ольшанський В. П. Определение закономерностей скорости потока зерновой смеси на виборешете при неравномерной подаче. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ*. 2009. Вип. 88. 5–11.
11. Терсков Г. Д. О влиянии основных факторов на пропускную способность решет с круглыми отверстиями. *Труды ЧИМЭСХ*. 1958. Т.7. 33–94.

Referencis

1. Piven, M.V. (2015). Obosnovanie proczessa separirovaniya zernovy'kh smesey ploskimi vibracziionny'mi reshetami [Substantiation of the process of separation of grain mixtures by flat vibrating screens]. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin, Vol.17 №.7*, 163–169 [in Russian].
2. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V. & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 7 (80), 63–69 [in English].
3. Kharchenko, S., Kovalishin, S., Zavgorodniy, A., Kharchenko, F. & Mikhaylov, Y. (2019). Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH. Agricultural Engineering*, 58, 2, 17–26 [in English].
4. Akhmadiev, F., Gizzyatov, R. & Kiyamov, K. (2013). Mathematical modeling of thin layer separation of granular materials on sieve classifiers. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 47, 3, 254–261 [in English].
5. Tischenko, L.N. (2001). Gidrodinamicheskie kharakteristiki psevdoozhzhenny'kh sy'puchikh sred pri vibrocenetrobeznom separirovanii na zernopererabatyvayushhikh predpriyatiyakh []. *Suchasni`napryamki tekhnologiyi ta mekhani`zaczi`yi proczesi`v pererobnikh ta kharchovikh virobnicztv. Vi`snik KhDTUSG*, 5, 13–33 [in Russian].
6. Yaczun, S.F. & Loktionova, O.G (2011). Vibracziionny'e mashiny` i tekhnologii dlya pererabotki granulirovanny'kh sred [Vibration machines and technologies for processing granular media]. *Stary`j Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii*, 296 [in Russian].
7. Bredikhi`n, V.V. (2001). Mekhani`ko-matematichna model` rukhu zernovikh sumi`shej u vi`bropnevmoцентрифугakh. [Mechanical-mathematical model of grain mixtures motion in vibropneumocentrifuges]. *Mekhani`zaczi`ya ta elektrifi`kaczi`ya si`l`s`kogo gospodarstva.*. Vip. 85, 116–119 [in Ukrainian].
8. Bredikhi`n, V.V. (2003). Obgruntuvannya parametri`v proczesu vi`bropnevmo`dczentrovogo rozdi`lennya nasi`nnyevikh sumi`shej za gustinoyu nasi`nnya [Substantiation of the parameters of the

- process of vibro-pneumatic centrifugal separation of seed mixtures by seed density]. *Dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.05.11 / KhDTUSG, Kharkiv*, 246 [in Ukrainian].
9. Goncharov, E.S. (1973) Teoriya neustojchivogo dvizheniya zerna po poverkhnosti vertikal'nykh cilindricheskikh centrobeznavibracionnykh reshet [Theory of unstable grain motion on the surface of vertical cylindrical centrifugal vibrating sieves]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyajstva, Vy'p. 25*, 39–44. [in Russian].
 10. Tishhenko, L.N., Ol'shans'kij, S.V. & Ol'shans'kij, V.P. (2009). Opredelenie zakonornostej skorosti potoka zernovoj smesi na vibroreshete pri neravnomernoj podache [Determination of the regularities of the flow rate of the grain mixture on the vibrating screen with uneven feed]. *Suchasni napryamki tekhnologiyi ta mekhanizatsiyi proczi'v pererobnikh i kharchovikh virobnicztv. Visnik KhNTUSG, Vip. 88*, 5–11 [in Russian].
 11. Terskov, G.D. (1958). O vliyanii osnovnykh faktorov na propusknuyu sposobnost' reshet s kruglymi otverstiyami [The influence of the main factors on the throughput of sieves with round holes]. *Trudy ChIME'SKh, T. 7*, 33–94 [in Russian].

Mykhailo Piven, PhD tech. sci.

Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

Experimental Studies Of The Specific Load Distribution Of The Mixture Over The Area Of The Inclined Tray

The regularities of specific loading distribution of loose mixture on the area of a working surface of the inclined tray are established in the work. The studies were performed on the experimental setup consisting of a storage hopper and inclined flat trays of different lengths. The material of the study was a grain mixture of winter wheat variety "Myronivska 30". The magnitude of the load was determined using a receiving device, which allowed to obtain the specific load distribution on the width and length of the tray and over time.

The specific loading of the tray is uneven in the area of the working surface: the central section is overloaded, and the wall is underloaded. The largest deviations of the specific load at the inlet of the tray, but with length they decrease, approaching a uniform distribution. The specific load profile across the width of the tray is asymmetric and has a local extremum. As the tray length increases, at the certain initial speed and angle, the specific load decreases and the mixture flow slows down. With a constant supply of material from the hopper, there is a gradual accumulation of the mixture in the tray, compaction and growth of the layer, which leads to complete cessation of flow. Uneven loading of the tray occurs due to uneven supply of material from the storage hopper, in which the movement begins. The initial feed varies across the width of the tray and over time, and the nature of the specific load profile formed at the entrance to the tray is preserved for almost its entire length.

The movement of the mixture flow in the inclined tray is non-stationary, the specific load varies significantly over the entire surface area and largely depends on the initial conditions of movement. The obtained regularities of specific loading on the working surface area of the tray can be used in the calculation of the modes of loose mixtures movement and substantiation of the equipment parameters for loading the working bodies of machines.

tray, loose mixture, specific surface load, uneven mixture feeding

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.365

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.88-96>**Р.А. Калініченко**, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна***С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Україна**e-mail: stepanenko_s@ukr.net***Б.І. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна*

Формування швидкісного режиму вібропереміщення зерна в процесах термообробки

У статті складено і розв'язано систему диференціальних рівнянь руху матеріальної точки вздовж пористої (повітропроникної) поверхні, що нахилена під кутом до горизонту. На основі аналізу рішень даної системи диференціальних рівнянь запропоновано змінювати швидкість переміщення зерна частотою коливань опорної поверхні, кутом нахилу опорної поверхні до горизонту та коефіцієнтом тертя. Також одержано графічні залежності швидкості переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні до горизонту, коефіцієнта тертя та частоти коливань.

Теоретично обґрунтована можливість уповільнення вібропереміщення зерна повітряним потоком, що подається знизу пористої опорної поверхні проти (під кутом) напрямку переміщення зерна, а також використанням асиметрично рифленої опорної поверхні з вертикальними перфораціями.

Експериментально визначена лінійна регресійна залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу віброуючої площини $5^\circ \div 9^\circ$, частоти коливань $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, швидкості повітряного потоку $0,1 \div 2 \text{ м/с}$; в оптимальних режимах роботи установки для високоінтенсивної термообробки зерна з вібротранспортером.

зерновий матеріал, інфрачервона обробка, опорна пориста поверхня, вібропереміщення, опорна поверхня з рифленнями, вертикальна перфорація, швидкість переміщення зерна, термообробка

Р.А. Калиниченко, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Нежинський агротехнічний інститут», г. Нежин, Україна***С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.*Національний научний центр «Інститут механізації и електрифікації сільського хозяйства», пгт Глеваха, Україна***Б.И. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подольский государственный аграрно-технический университет, г. Каменец-Подольский, Украина*

Формирование скоростного режима виброперемещения зерна в процессе термообработки

В статье составлена и решена система дифференциальных уравнений движения материальной точки вдоль пористой (воздухопроницаемой) поверхности, которая наклонена под углом к горизонту. На основе анализа решений данной системы дифференциальных уравнений предложено изменять скорость перемещения зерна частотой колебаний опорной поверхности, углом наклона опорной поверхности к горизонту и коэффициентом трения. Также получены графические зависимости скорости перемещения зерна от угла наклона опорной поверхности к горизонту, коэффициента трения и частоты колебаний.

Теоретически обоснована возможность замедления виброперемещения зерна воздушным потоком, что подается снизу пористой опорной поверхности против (под углом) направления перемещения зерна, а также использованием асимметрично рифленной опорной поверхности с вертикальными перфорациями.

© Р.А. Калініченко, С.П. Степаненко, Б.І. Котов, 2020

Экспериментально определена линейная регрессионная зависимость изменения скорости виброперемещения, которая дает возможность формирования необходимого скоростного режима виброперемещения зерна изменением параметров: наклона вибрирующей плоскости $5^{\circ} \div 9^{\circ}$, частоты колебаний $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, скорости воздушного потока $0,1 \div 2 \text{ м/с}$ в оптимальных режимах работы установки для высокоинтенсивной термообработки зерна с вибротранспортером.

зерновий матеріал, інфрачервона обробка, опорна пориста поверхність, виброперемещение, опорна поверхність з рифленням, вертикальна перфорація, швидкість переміщення зерна, термообробка

Постановка проблеми. Застосування інфрачервоного (ІЧ) опромінення зернових матеріалів реалізується для сушіння, попереднього нагріву, дезинсекції і підвищення якості посівного матеріалу. Одним із перспективних напрямків використання ІЧ випромінювання як способу підведення енергії є мікронізація – інтенсивний нагрів фуражного зерна або круп високоінтенсивним ІЧ-опроміненням, що дозволяє досягнути суттєвих змін в хімічних, мікробіологічних, фізико-механічних комплексах продукту для підвищення його споживчих властивостей [1,2]. Інфрачервона обробка (ІЧО) зерна, зернопродуктів і насіння застосовується як самостійний вид обробки, так і в якості окремої операції в різноманітних технологічних процесах. Кожний вид ІЧО зернового матеріалу потребує певної тривалості – експозиції обробки. В безперервних установках, які в якості транспортних засобів для переміщення матеріалу (під час опромінювання) використовують стрічкові транспортери, потрібна експозиція реалізовується зміною швидкості стрічки, що легко технічно реалізується. Але при використанні стрічкових транспортерів зерновий матеріал розміщують на поверхні стрічки моношаром (в одне зерно), що вимагає збільшення довжини транспортного засобу. Застосування вібраційних транспортерів значно підвищує ефективність обробки, оскільки, дозволяє перемішувати шар зернового матеріалу, змінювати орієнтацію зернівок неперервно і збільшувати висоту шару [3]. Тому для ІЧО зернового матеріалу в умовах господарств можна використовувати, як транспортний засіб «решітний стан» віброрешітних зерноочисних машин, які працюють на очищенні обмежений проміжок часу. Але при цьому виникає проблема забезпечення необхідного, керованого режиму переміщення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи теорії вібраційного переміщення сипких матеріалів закладено в роботах І.І. Блехмана [4] і розвинуто (для переміщення зернового матеріалу) в роботах [5, 6]. В подальшому задачі дослідження процесів вібраційного переміщення матеріалів виконані для окремих технологічних процесів, відповідно до завдань проектування відповідних машин: переміщення [7], сушіння [3], нагріву [8], мікрохвильової обробки зернових [9], інфрачервоного опромінення [10]. У перелічених роботах розглядаються випадки розрахунку швидкості переміщення частинки на коливній поверхні при незмінних за координатою і в часі характеристик матеріалу і кінематичних параметрах опорної коливної поверхні. Але в процесі термообробки параметри транспортуючого матеріалу є змінними [3, 11], що вимагає корегування розрахунків кінематичних параметрів. Крім того, при використанні елементної бази існуючих віброрешітних машин виникають задачі гальмування і зміни швидкості переміщення продукту в напрямку руху, які в існуючих публікаціях висвітлені недостатньо.

Постановка завдання. Метою досліджень є удосконалення математичного опису і розрахунку процесу вібраційного переміщення зерна із змінними в часі властивостями і виявлення можливостей керування швидкістю.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень використаний метод Даламбера для динамічних систем та теорія зерноочисних вібраційних машин. Також

була застосована теорія багатофакторного експерименту та регресійний аналіз. Побудова графічних залежностей виконана за допомогою комп'ютерних програм.

Розглядається, рух частинки (матеріальної точки) масою m вздовж пористої (повітропроникної) поверхні, що нахилена під кутом α до горизонту, яка здійснює коливання з амплітудою A і частотою ω по закону $S = A \sin \omega t$. Кут нахилу траєкторії коливань опорної поверхні β . На рис.1 показано розподіл сил, що діють на частинку: сила тяжіння G , сила тертя F_m , нормальна реакція N , сила гідравлічного тиску повітряного потоку, яка дорівнює силі опору повітряного потоку R_n , що діє на частинку під кутом γ до опорної поверхні.

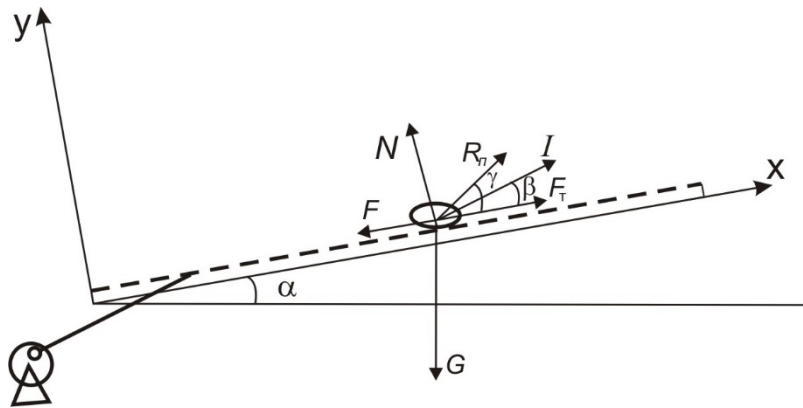


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на частинку при переміщенні по поверхні, яка здійснює гармонічні коливання.

Джерело: розроблено авторами

При сумісній дії на частинку коливної площини і повітряного потоку відомі рівняння руху частинки [6, 7, 10] матимуть вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cdot \cos\beta \cdot \sin\omega t - mg \cdot \sin\alpha - Nf + R_n \cdot \cos\gamma, \\ m\ddot{y} = mA\omega^2 \cdot \sin\omega t \cdot \sin\beta - mg \cdot \cos\alpha + N + R_n \cdot \sin\gamma, \end{cases} \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя,

$Nf = F_t$ – сила тертя, Н;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Діюча на частинку сила аеродинамічного опору (тиску), яка в межах режиму обтікання частинки повітрям (за умови $10^2 \leq Re \leq 10^5$) може бути визначена за формулою [13]:

$$R_n = mk_n(V_n - V)^2, \quad (3)$$

де $k_B = \frac{g}{V_{шт}^2}$ – коефіцієнт вітрильності;

$V_{шт}^2$ – швидкість витання частинки, м/с.

Оскільки у робочих режимах руху частинки швидкості повітря $V_n \gg V$ (V – швидкість частинки) то:

$$R_n = mk_n V_n^2. \quad (4)$$

При переміщенні частинки по вібруючій площині у безвідривному режимі (умовою якого є: $N > 0$, або $\frac{g \cos\alpha}{A\omega^2 \sin\beta} > 1$ [6]) координата y дорівнює нулю, а сила тертя визначається співвідношенням:

$$F = \begin{cases} -fN, & \dot{x} > 0; \\ fN, & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Нормальна реакція знаходиться із рівняння (2):

$$N = mg \cdot \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \beta - R_n \cdot \sin \gamma. \quad (6)$$

Підставляючи значення N з (6) в рівняння (1) і замінюючи $f = \operatorname{tg} \rho$ та $P = \frac{R_n}{mg}$ після перетворень отримаємо:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \rho) \mp P \cdot \sin(\gamma \pm \rho)}{\cos(\beta \mp \rho)} \right]. \quad (7)$$

Верхні знаки, відповідно до [6], відповідають до позитивного напрямку відносно швидкості переміщення ($x > 0$), а нижні негативному напрямку ($x < 0$).

Подальші розрахунки і перетворення для визначення швидкості переміщення виконано за методикою [6].

Рівняння (6) представлено в загальному вигляді:

$$\ddot{x} = a_{\pm} (\sin \delta - Z_{\pm}), \quad (8)$$

де $a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho}$; $\delta = \omega t$.

$$Z_{\pm} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \rho) \mp P \cdot \sin(\gamma \pm \rho)}{\cos(\beta \mp \rho)}. \quad (9)$$

Верхні знаки – рух вгору, нижні – рух донизу.

Упускаючи відомі перетворення наведені в [6], запишемо кінцеві результати.

$$V = \frac{A\omega}{\pi \cdot \cos \rho} \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (\varepsilon Z_+)^2} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \rho}\right) \cos(\beta - \rho) - \left(1 + \frac{\pi - \varepsilon}{k-1}\right) \cos(\beta + \rho) \right], \quad (10)$$

де $\varepsilon = \pi \frac{k}{k-1}$; $k = \frac{Z_-}{Z_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho) \cos(\beta - \rho)}{\cos(\beta + \rho) \sin(\alpha + \beta)}$, або:

$$V = A\omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon Z_+}{\sin \rho}\right)^2} \left[\frac{2f}{\pi} \operatorname{tg} \beta \left(\operatorname{tg} \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right].$$

Розглядаючи можливість зміни швидкості переміщення частинки, звернемо увагу на такі обставини:

- 1) оскільки, величина амплітуди коливань A є величиною сталою, то швидкість переміщення є функцією частоти коливань $V(\omega)$;
- 2) величина ε визначатиме вплив кутів α , ρ на швидкість переміщення так, як величина β є нерегульованою;
- 3) на швидкість переміщення зерна впливає величина швидкості повітря V_n і кут вектора його спрямування γ .

Таким чином змінювати швидкість переміщення зерна окрім частотою коливань, можна зміною кута нахилу опорної поверхні до горизонту та зміною коефіцієнта тертя.

В роботах [12,13] для зменшення швидкості вібраційного переміщення використано опорну поверхню із різним коефіцієнтом тертя при русі в різних напрямках або пружні елементи, що гальмують шар зерна в одному з напрямів руху опорної поверхні. В нашому випадку розглядається рух частинки вздовж опорної поверхні виконаної з металевого полотна з лускатими рифлями, що розміщені на

поверхні в шаховому порядку (рис. 2), які утворюють асиметрично рифлену поверхню з вертикальними перфораціями.

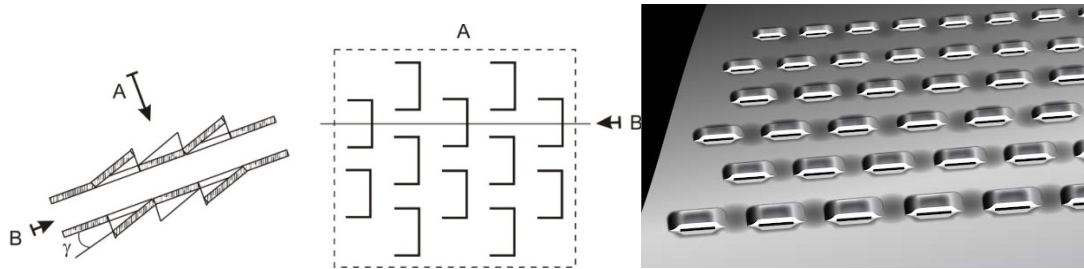


Рисунок 2 – Схема розміщення жалюзійних рифлів на опорній поверхні зовнішній вигляд полотна

Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунків за формулами (4-10) представлено у вигляді графічних залежностей швидкості переміщення частинки від швидкості повітря (рис. 3 а) та кута нахилу опорної поверхні (рис. 3 б).

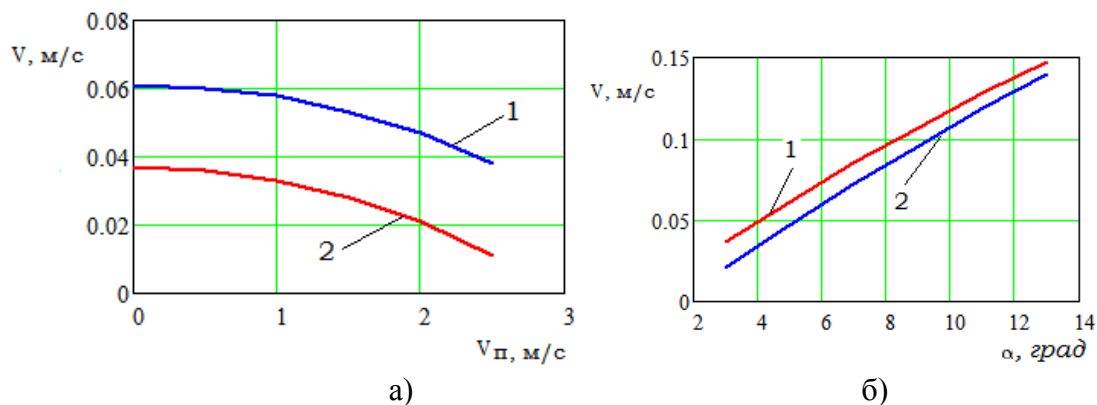


Рисунок 3 – Залежності швидкості переміщення частинки від швидкості повітря:

а) – 1 – кут нахилу $\alpha=5^\circ$; 2 – кут нахилу $\alpha=3^\circ$; та б) – 1 – без повітряного потоку; 2 – $V_{\text{п}}=2$ м/с

Джерело: розроблено авторами

Для виявлення впливу швидкості повітряного потоку і кута його нахилу до поверхні зроблено розрахунки швидкості переміщення частинки по поверхням з круглими отворами діаметром 2 мм ($\rho=24^\circ 20' \dots 28^\circ 30'$) і листу з лускатими рифлями ($\rho=30 \dots 36^\circ$ – рух назад, $\rho=36 \dots 43^\circ$ – рух вперед).

При розрахунках швидкості переміщення частинки вздовж асиметрично рифленої поверхні (при безвідливому двосторонньому русі з двома миттєвими зупинками) в розрахункові формули (9) і (10) внесені корективи: оскільки кут тертя має різні значення в напрямках руху «вперед» – S_+ і «назад» – S_- то величини ковзання Z_+ і Z_- та їх співвідношення визначатиметься за формулою [12, 13]:

$$Z_{\pm} = \frac{g \sin(\alpha \pm \rho_{\pm}) \mp \rho \sin(\gamma \pm \rho_{\pm})}{A \omega^2 \cos(\beta \mp \rho_{\mp})} \quad (11)$$

де ρ_+ – кут тертя при переміщенні «вперед», град;

ρ_- – кут тертя при переміщенні «назад», град;

$$k = \frac{z_-}{z_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho_-) \cos(\beta - \rho_-)}{\cos(\beta + \rho_+) \sin(\alpha + \beta)}.$$

Коефіцієнт асиметрії коефіцієнту тертя:

$$k_f = \frac{\rho_-}{\rho_+}. \quad (12)$$

Результати розрахунків у вигляді графічних залежностей швидкості переміщення від швидкості подачі повітря і кутів тертя наведені на рис. 4 і рис. 5.

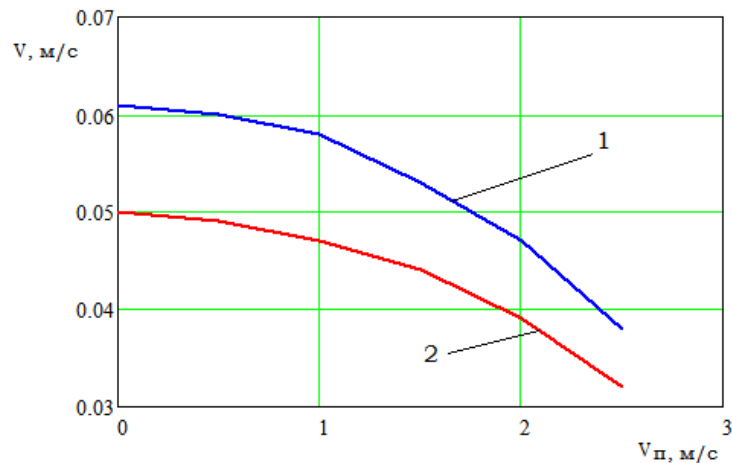


Рисунок 4 – Залежності швидкості переміщення зерна за умов $\gamma=15^\circ$, $\omega=52 \text{ c}^{-1}$, $\alpha=5^\circ$:

1 – перфорована поверхня $\rho=27^\circ$; 2 – асиметрична перфорована поверхня $\rho_+=36^\circ$, $\rho_-=30^\circ$

Джерело: розроблено авторами

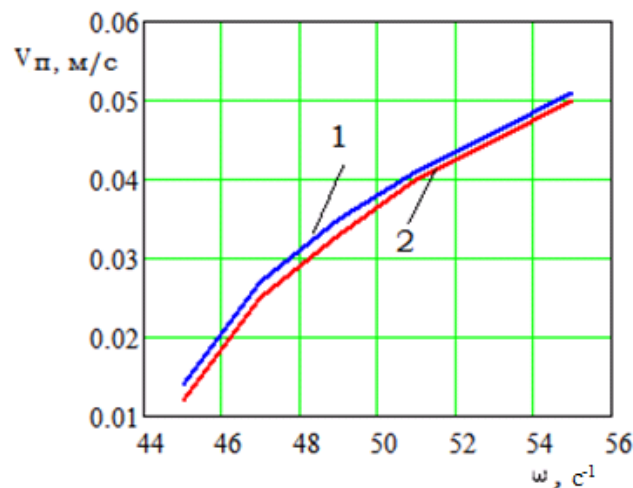


Рисунок 5 – Залежності швидкості переміщення зерна на асиметричній перфорованій поверхні $\rho_+=36^\circ$, $\rho_-=30^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $V_n=1.5 \text{ м/с}$: 1– $\gamma=20^\circ$; 2– $\gamma=10^\circ$

Джерело: розроблено авторами

Для уточнення результатів розрахункових досліджень шляхом їх співставлення з даними експериментів проведено багатофакторний експеримент на установці розробленій в ННЦ «ІМЕСГ». Змінними факторами прийнято: частота коливань поверхні ω , кут її нахилу α , швидкості повітря V_n та коефіцієнта асиметрії коефіцієнта тертя – k_f .

За результатами експериментів отримано рівняння лінійної регресії (13), яке описує залежність швидкості переміщення шару зернового матеріалу вздовж опорної коливної поверхні від кута нахилу поверхні, швидкості повітряного потоку (крізь перфорації), коефіцієнту асиметрії тертя, частоти коливань:

$$V = 0.023 + 0.0037\alpha - 0.004V_n + 0.23k_f + 0.0047\omega; \quad (13)$$

де α – кут нахилу вібраційної поверхні, $3 \div 9$ град;

V_n – швидкість повітряного потоку, $0,1 \div 2$ м/с;

k_f – коефіцієнт асиметрії коефіцієнта тертя, $0,7 \div 0,85$;

ω – частота коливань, $45 \div 55$ с⁻¹.

Графічна інтерпретація отриманих результатів подана у вигляді поверхонь швидкості переміщення зернового матеріалу від змінних факторів на рис. 6, рис. 7.

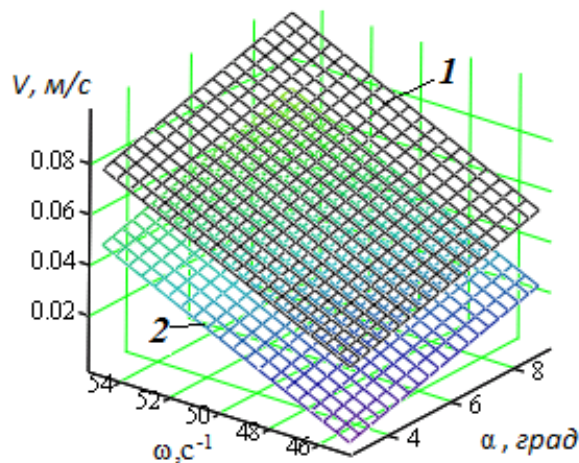


Рисунок 6 – Залежності швидкостей переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні

і частоти за умов $V_n = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$: 1 – $k_f = 0,7$; 2 – $k_f = 0,85$

Джерело: розроблено авторами

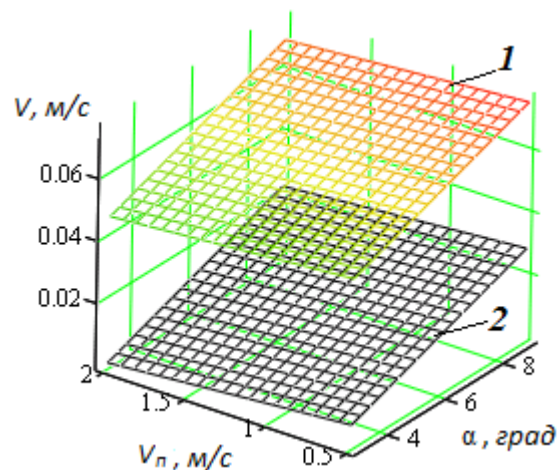


Рисунок 7 – Залежності швидкостей переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні і швидкості

повітряного потоку за умов $k_f = 0,85$:

1 – $\omega = 55$ с⁻¹; 2 – $\omega = 45$ с⁻¹.

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Теоретично обґрунтована можливість уповільнення вібропереміщення зерна повітряним потоком, що подається знизу пористої опорної поверхні проти (під кутом) напрямку переміщення зерна, а також використанням асиметрично рифленої опорної поверхню з вертикальними перфораціями.

Експериментально визначена лінійна регресійна залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу вібруючої площини $5^\circ \div 9^\circ$, частоти коливань $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, швидкості повітряного потоку $0,1 \div 2 \text{ м/с}$; в оптимальних режимах роботи установки для високоінтенсивної термообробки зерна з вібротранспортером.

Список літератури

1. Елькин Н. В. Высокотемпературные инфракрасные технологии нового тысячелетия. *Хранение и переработка зерна*. 2020, № 9. С. 47-50.
2. Елькин Н. В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы. *Хранение и переработка зерна*. 2006, № 4. С. 26-30.
3. Беляев М. И., Пахомов П. Л. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов, Х., ХИОП. 1991. 260 с.
4. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.
5. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К.: Изд-во УСХА, 1998. 625 с.
6. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1980. 304 с.
7. Потураев В. Н. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов. К.: Наукова думка, 1989. 248 с.
8. Калиниченко Р. А., Степаненко С. П. Математическое моделирование виброперемещения зерна при термообработке. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. Вып. 4(25). С. 51-55.
9. Орлова С. С. Определение параметров вибротранспортирования при микроволновой обработке зерновых. *Наукові праці ОНАХТ*. 2006. -Вип. 29, т. 2. С. 205-207.
10. Калініченко Р. А. Дослідження впливу низхідного повітряного потоку на поєднані процеси ІЧ-термообробки і переміщення зернових матеріалів на вібротранспортері. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. № 262. С. 56–66.
11. Губанов А. А., Калинин В. И., Ромалийский В. С., Абдрахманов А. С. О результатах экспериментального изучения коэффициента динамического трения семян зерновых культур. *НТБ ВИМ*. 1976. Вып. 30. С. 48-51.
12. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11; УААН, ННЦ "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства". Глеваха, 2008. 20 с.
13. Моделирование технологических процессов в типовых объектах послезбиральной обработки и зберігання зерна (сепарация, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

References

1. Elkin, N. V. (2020). High-temperature infrared technologies of the new millennium. *Grain storage and processing*, № 9, 47-50 [in Russian].
2. Elkin, N. V. (2006). Theory and practice of infrared processing of grain and cereals. *Grain storage and processing*, № 4, 26-30 [in Russian].
3. Belyaev, M. I. & Pakhomov, P. L. (1991). Theoretical foundations of combined methods of heat treatment of food products. Kharkiv [in Russian].
4. Blekhan, I. I. & Dzhanelidze, G. Yu. (1964). Vibration displacement. Moscow [in Russian].
5. Zaika, P. M. (1998). Vibrational movement of solid and loose bodies in agricultural machines. Kiev [in Russian].
6. Gortinsky, V. V., Demsky, A. B. & Boriskin M. A. (1980). Separation processes at grain processing plants. Kiev [in Russian].
7. Krausp, R. V. (1975). Automation of post-harvest grain processing. Moscow [in Russian].

8. Kalinichenko, R. A. & Stepanenko, S. P. (2017). Mathematical modeling of vibration displacement of grain during heat treatment. *Innovations in agriculture, Issue 4 (25)*, 51-55 [in Russian].
9. Orlova, S. S. (2006) Determination of the parameters of vibratory transportation during microwave processing of grain. *Science works ONAHT, Vol. 29, 2*, 205-207 [in Russian].
10. Kalinichenko, R. A. (2017). Investigation of downward air flow on combined processes of infrared heat treatment and movement of grain materials to vibratory conveyor. *Scientific Herald NUBiP Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex, № 262*, 56–66 [in Ukrainian].
11. Gubanov, A. A., Kalinin, V. I. & Romalisky, V. S. (1976) On the results of experimental study of the coefficient of dynamic friction of seeds of grain crops. *NTB VIM, № 30*, 48-51 [in Russian].
12. Stepanenko, S. P. (2008). Advanced efficiency of vibropneumatic grain separators. *Extended abstract of candidate's thesis*. Glevakha. [in Ukrainian].
13. Kotov, B. , Kalinichenko, R., Stepanenko S. et al. (2017). Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling). Nizhin : Publisher PP Lisenko M. [in Ukrainian].

Roman Kalinichenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Nizhyn, Ukraine

Serhii Stepanenko, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Agricultural Mechanization and Electrification", Glevakha, Ukraine

Boris Kotov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Podilsky State Agrarian Technical University, Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Formation of a High-speed Mode of Vibration Displacement of Grain During Heat Treatment

The article compiled and solved a system of differential equations of motion of a material point along a porous (air-permeable) surface, which is inclined at an angle to the horizon. Based on the analysis of solutions to this system of differential equations, it is proposed to change the speed of grain movement by the frequency of oscillations of the support surface, the angle of inclination of the support surface to the horizon and the coefficient of friction. Also, the graphical dependences of the speed of grain movement on the angle of inclination of the support surface to the horizon, the coefficient of friction and the frequency of oscillations were obtained.

The possibility of decelerating the vibration movement of grain by an air flow, which is fed from the bottom of the porous support surface against (at an angle) the direction of grain movement, as well as using an asymmetrically corrugated support surface with vertical perforations, is theoretically substantiated.

A linear regression dependence of the change in the vibration displacement speed has been experimentally determined, which makes it possible to form the required speed mode of vibration displacement of grain by changing the parameters: the inclination of the vibrating plane is $5^{\circ} \div 9^{\circ}$, the vibration frequency is $45 \div 55 \text{ s}^{-1}$, the air flow speed is $0.1 \div 2 \text{ m/s}$ in optimal operating modes. installations for high-intensity heat treatment of grain with a vibratory conveyor.

grain material, infrared processing, porous support surface, vibration displacement, corrugated support surface, vertical perforation, grain speed, heat treatment

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.331.022

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.97-107>**І.М. Осипов**, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: kntu.shm.osipovim@gmail.com*

Обґрунтування типу повітророзподільного пристрою пневмомеханічних просапних сівалок

Встановлено, що для пневмомеханічних сівалок виконання вимог агротехніки по рівномірності розподілу насіння за площею живлення цілком залежить від правильного вибору конструкції висівної системи. Перспективним розвитком конструкцій просапних сівалок є використання пневмомеханічних висівних систем, що складає передумови для підвищення продуктивності праці і знижує прямі витрати при посіві. Але, в ряді випадків, таке технічне рішення приводить до росту металоємності сівалок, ускладнює їх обслуговування. Проведені дослідження дозволили пояснити причину нерівномірності розподілу повітряного потоку по ширині захвату, яка обумовлена нерівномірністю статичного тиску, зменшення якого відбувається в напрямку від периферії ресивера до його центру. Отримані результати пройшли лабораторну перевірку, яка повністю підтвердила результати теоретичних досліджень.

ресивер, пневмомеханічний висівний апарат, сівалка, вакуумна камера, повітряний потік, розрідження, втрати тиску, гідравлічний опір

И.Н. Осипов, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина*

Обоснование типа воздухораспределительного устройства пневмомеханических пропашных сеялок

Установлено, что для пневмомеханических сеялок выполнение требований агротехники по равномерности распределения семян по площади питания полностью зависит от правильного выбора конструкции высевальной системы. Перспективным развитием конструкций пропашных сеялок является использование пневматических высевальных систем что составляет предпосылки для повышения производительности труда и снижает прямые затраты при посеве. Но, в ряде случаев, такое техническое решение приводит к росту металлоемкости сеялки, затрудняет их обслуживание. Проведенные исследования позволили объяснить причину неравномерности распределения воздушного потока по ее ширине захвата, которая обусловлена неравномерностью статического давления, уменьшение которого происходит в направлении от периферии ресивера к его центру. Полученные результаты прошли лабораторную проверку, которая полностью подтвердила результаты теоретических исследований.

ресивер, пневмомеханический высевальной аппарат, сеялка, вакуумная камера, воздушный поток, разрежение, потери давления, гидравлическое сопротивление

Постановка проблеми. Одним з важливих показників якості посіву є рівномірність розподілу насіння за шириною захвату сівалки, яка, для пневмомеханічних сівалок, можлива тільки при рівному відборі повітря з усіх висівних апаратів по її ширині захвату [1]. В конструкціях сучасних пневмомеханічних просапних сівалок дане питання вирішено не в повній мірі. Цей недолік особливо проявляється у широкозахватних сівалок. Збільшення рядності призводить до збільшення нерівномірності розріджень, наслідком чого є збільшення нерівномірності висіву [2, 3].

На сьогоднішній день для визначення основних аеродинамічних характеристик пневмомеханічних висівних систем, а також для вибору раціональної схеми повітророзподільного пристрою, який забезпечував би рівномірний розподіл повітряного потоку по ширині захвату сівалки, та обґрунтування його параметрів необхідні додаткові дослідження, а саме, математичний опис процесу пневможивлення висівних апаратів.

В зв'язку з необхідністю інтенсифікації сільськогосподарського виробництва, наявністю нових сортів насіння просапних культур, які ставлять більш високі вимоги до рівномірності розподілу насіння по площі живлення з метою отримання максимальних врожаїв, підвищенню якості посівного матеріалу – актуальність цієї задачі зростає.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напрямок розвитку технічних засобів для висіву насіння просапних культур визначає намічена за останні роки тенденція застосування пневмомеханічних висівних систем [1, 2, 3].

Одним з напрямків інтенсифікації сільськогосподарського виробництва є підвищення продуктивності машин. Таке підвищення може бути досягнуто за рахунок збільшення ширини захвату [1, 2, 3, 5], але при цьому посилюється проблема рівномірного розподілу повітряного потоку в висівних апаратах по ширині захвату сівалки, наслідком чого є збільшення нерівномірності висіву.

Нерівномірність висіву 9-ти рядної пневмомеханічної овочевої сівалки СУПО-9А зростає по відношенню до 6-ти рядної СУПО-6А з 4,1-6,3% до 14,5-15,3% при висіві насіння томатів і з 1,1-3,4% до 5,4-5,5% при висіві насіння капусти [1, 4].

Пневмомеханічна просапна сівалка СУПН-8А також не в повній мірі відповідає вимогам до рівномірності висіву. Випробуваннями встановлено, що цей показник коливається в межах 7,4-9,4% при висіві насіння кукурудзи і 3,2-4,9% при висіві насіння соняшнику [1, 4] (по АТВ 5% для кукурудзяних сівалок і 3% для бурякових). В процесі роботи сівалки цей показник погіршується. Після напрацювання сівалкою 10 га додаткова перевірка виявила збільшення нерівномірності висіву до 44,4% [4]. Тобто, задача рівномірного розподілу насіння по площі живлення, яка є найважливішою при посіві, не виконується.

З цієї причини кожний висівний апарат по ширині захвату сівалки потребує індивідуального налагодження за допомогою скидача «зайвого» насіння, що значно ускладнює підготовку сівалки до роботи, особливо в умовах господарств.

Введення в висівний апарат пристроїв, що забезпечують рівномірне відсмоктування повітря, змінюючи живий переріз вакуумної камери [1, 2, 3, 4], ускладнює конструкцію висівного апарата.

Повітророзподільний пристрій з двома колекторами, встановленими у вхідного вікна вентилятора, по типу сівалки Monoair-80 (Німеччина) [1, 2, 3, 4] ускладнює конструкцію, не створюючи помітних переваг в покращенні рівномірності відбору повітря з висівних апаратів.

Останнім часом з'явилися інші оригінальні пропозиції, спрямовані на підвищення рівномірності висіву за рахунок стабілізації розрідження в вакуумних камерах висівних апаратів по ширині захвату сівалки.

Пропонується [4] встановлювати ресивер, в якості якого використані дві труби різного діаметра. В порожнині труби більшого діаметра (збирального колектора) розташована труба меншого діаметра (відсмоктувальний колектор) з отворами, сполучена за допомогою штуцерів та трубопроводів з всмоктувальним вікном вентилятора. При роботі сівалки вакуум, що створюється вентилятором, через трубопроводи та отвори відсмоктувального колектора, кількість яких в два рази менше кількості висівних апаратів, передається в збиральний колектор, а з нього через

повітроводи – в вакуумні камери висівних апаратів. Недоліком такого повітророзподільного пристрою є його велика металоємність, складність виготовлення, а також значні втрати тиску при багаторазовій зміні напрямку руху повітряного потоку в збиральному та відсмоктувальному колекторах.

В іншій конструкції [1, 4] пропонується встановлювати на кожному висівному апараті ежектор з всмоктувальною камерою, сполученою з вакуумною камерою висівного апарата. При роботі сівалки джерело стислого повітря подає його в ресивер а далі по повітроводах до ежектуючих труб ежекторів. Потік повітря, виходячи з ежектуючої труби, створює розрідження в вакуумній камері висівного апарата. Такий пристрій громіздкий, складний у виготовленні, а також має велику енергоємність з причини низького ККД ежектора. Ефективність використання такого складного пристрою викликає сумніви.

Отже, в теперішній час для просапних сівалок найбільш ефективними є пневмомеханічні висівні системи вакуумного типу з апаратами індивідуального дозування. Для виявлення найбільш раціонального типу повітророзподільного пристрою, який забезпечував би рівномірний розподіл повітряного потоку в висівних апаратах по ширині захвату сівалки, необхідні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Дослідження проводились з метою максимального наближення врожайності просапних культур до її потенційного кордону за рахунок поліпшення рівномірності розподілу насіння по площі живлення шляхом вибору раціональної схеми повітророзподільного пристрою та обґрунтування його параметрів.

Згідно висунутої робочої гіпотези рівномірний розподіл насіння по площі живлення пневмомеханічною сівалкою з висівними апаратами вакуумного типу можливий при рівномірному розподілі повітряного потоку по її висівній системі.

Виклад основного матеріалу. Встановлено, що для просапних сівалок з пневмомеханічними висівними апаратами вакуумного типу найбільш широкого поширення знайшли повітророзподільні пристрої двох типів [4]:

1) з колектором, встановленим на корпусі вентилятора, та повітроводами, з'єднаними з висівними апаратами;

2) з ресивером, внутрішня порожнина якого з'єднана з вентилятором і приєднаними до його бокової поверхні повітроводами однакової довжини, сполученими з висівними апаратами.

З метою встановлення найбільш раціонального типу повітророзподільного пристрою проведено аналіз умов пневможивлення висівних апаратів. В якості критерію при оцінюванні нерівномірності величини розрідження в висівних апаратах по ширині захвату сівалки використовується коефіцієнт варіації [5]:

$$W = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n p_i\right)^2}} - 1 \cdot 100, \quad (1)$$

де W – коефіцієнт варіації, %;

n – рядність сівалки;

p_i – розрідження в i -ому висівному апараті, Па.

Розглянемо повітророзподільний пристрій n -рядної сівалки з колектором (рис. 1) і відповідно до перерізів $a-b$ запишемо рівняння Бернуллі: [6]:

$$p_a = p_b + \frac{\rho V_i^2}{2} + \Delta p_{a-b}, \quad (2)$$

де p_a – атмосферний тиск, Па;
 p_b – статичний тиск в перерізі b , Па;
 ρ – щільність повітря, кг/м³;
 V_i – швидкість повітряного потоку в i -ому повітроводі, м/с;
 Δp_{a-b} – втрати тиску на ділянці $a-b$, Па.

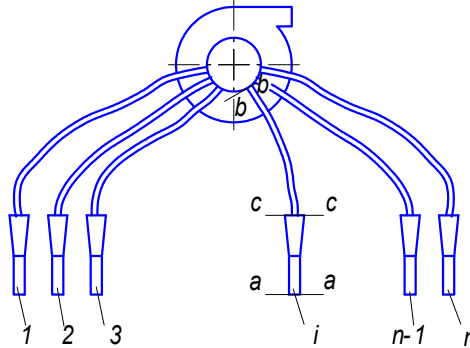


Рисунок 1 – Розрахункова схема повітророзподільного пристрою з колектором
Джерело: розроблено автором

Втрати тиску на ділянці $a-b$ складаються з втрат в висівному апараті та втрат на тертя при переміщенні повітряного потоку в повітропроводі:

$$\Delta p_{a-b} = \Delta p_{ва} + \Delta p_{мп}, \quad (3)$$

де $\Delta p_{vai} = \zeta \frac{\rho V_i^2}{2}$ – втрати тиску в i -му висівному апараті, Па;

$\Delta p_{mpi} = \lambda \frac{l_i}{d} \frac{\rho V_i^2}{2}$ – втрати тиску на тертя в i -ому повітропроводі;

тут ζ – коефіцієнт гідравлічного опору висівного апарата;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору повітропроводу;

d – прохідний діаметр повітропроводу, м;

l_i – довжина i -го повітропроводу, м.

$$\Delta p_{a-b} = \left(\zeta + \lambda \frac{l_i}{d} \right) \frac{\rho V_i^2}{2}. \quad (4)$$

Підставивши у вираз (2) знайдене значення Δp_{a-b} з (4) та враховуючи, що статичний тиск в перерізі b дорівнює різниці атмосферного тиску та вакууметричного в колекторі, після відповідних перетворень знайдемо швидкість повітряного потоку в i -ому повітропроводі:

$$V_i = \sqrt{\frac{2p_{ваккол}}{\rho \left(1 + \zeta + \lambda \frac{l_i}{d} \right)}}, \quad (5)$$

де $p_{ваккол}$ – розрідження в колекторі, Па.

Запишемо рівняння Бернуллі відповідно до перерізів $a-c$ (рис. 1):

$$p_a = p_c + \frac{\rho V_i^2}{2} + \Delta p_{vai}, \quad (6)$$

де p_c – статичний тиск в перерізі c , Па.

Підставивши в вираз (6) значення Δp_{vai} і враховуючи, що статичний тиск в перерізі c дорівнює різниці атмосферного тиску та вакууметричного в місці сполучення

повітропроводу з вакуумною камерою, отримаємо величину розрідження в i -му висівному апараті:

$$p_{\text{вак}i} = (1 + \zeta) \frac{\rho V_i^2}{2}. \quad (7)$$

Підставивши значення V_i з (5), отримаємо:

$$p_{\text{вак}i} = \frac{1 + \zeta}{1 + \zeta + \lambda \frac{l_i}{d}} p_{\text{ваккол}}. \quad (8)$$

Враховуючи (8) отримаємо з (1) вираз для визначення коефіцієнту варіації нерівномірності розріджень в вакуумних камерах висівних апаратів по ширині захвату сівалки з колектором:

$$W = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \zeta + \lambda \frac{l_i}{d}} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \zeta + \lambda \frac{l_i}{d}} \right)^2}} - 1 \cdot 100. \quad (9)$$

Встановимо величину коефіцієнту варіації рівня розрідження в висівних апаратах пневмомеханічних сівалок з ресивером постійного поперечного перерізу (рис. 2).

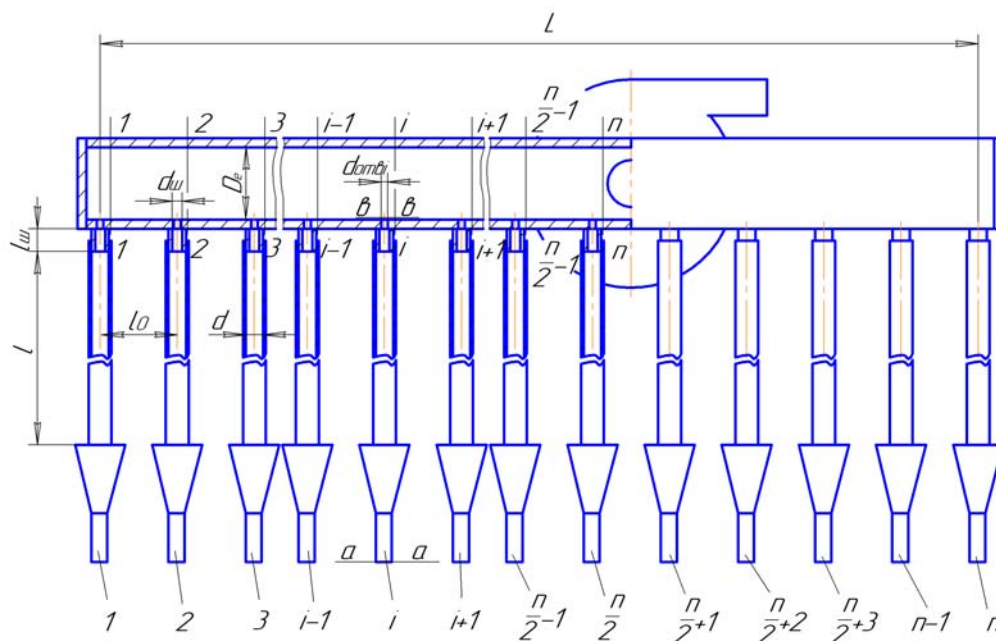


Рисунок 2 – Розрахункова схема повіторозподільного пристрою з ресивером

Джерело: розроблено автором

Оскільки повітропроводи симетрично розташовані відносно вентилятора (рис. 2), розглянемо роботу лише однієї частини (лівої).

Підставивши в (1) значення $p_{\text{вак}i}$ з (7) знайдемо:

$$W = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} V_i^4}{2 \left(\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} V_i^2 \right)^2} - 1} \cdot 100. \quad (10)$$

Збільшення витрат повітря від перерізу $i-1$ до перерізу i дорівнює витратам повітря, яке надходить з i -ого висівного апарата. Таким чином, можна записати:

$$F(V_{pi} - V_{pi-1}) = fV_i, \quad (11)$$

де F – площа прохідного перерізу ресивера, м^2 ;

f – площа похідного перерізу повітропроводу, м^2 ;

V_i – швидкість повітряного потоку в i -ому повітропроводі, м/с ;

V_{pi} – швидкість повітряного потоку в перетинах ресивера, м/с .

Використовуючи (11) отримаємо величину коефіцієнту варіації:

$$W = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} (V_{pi} - V_{pi-1})^4}{2 \left[\sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} (V_{pi} - V_{pi-1})^2 \right]^2} - 1} \cdot 100. \quad (12)$$

Запишемо рівняння кількості рухів [7] в проекції на повздовжню вісь ресивера стосовно до об'єму, обмеженому перерізами $i-1$ та i , а також стінками ресивера:

$$p_{i-1}F - p_iF - \pi Pl_0 = \rho F V_{pi}^2 - \rho F V_{pi-1}^2, \quad (13)$$

де p_i – статичний тиск в перерізах ресивера, Па ;

P – периметр ресивера, м ;

l_0 – відстань між осями повітропроводів, м ;

$\tau_{i-1} = \frac{\lambda_{pi-1}}{4} \frac{\rho V_{pi-1}^2}{2}$ дотичні напруження в перетині $i-1$ ресивера, Н/м^2 ,

тут λ_{pi-1} – коефіцієнт гідравлічного опору в перетині $i-1$ ресивера.

Швидкість повітряного потоку в i -му штуцері можна визначити, використовуючи формулу витікання [8]:

$$V_{ui} = \mu \sqrt{\frac{2(p_a - p_i)}{\rho}}, \quad (14)$$

де μ – коефіцієнт витрат;

V_{ui} – швидкість повітряного потоку в i -му штуцері, м/с .

Використовуючи залежність (14), різницю статичних тисків можна представити у вигляді:

$$p_{i-1} - p_i = \frac{\rho V_{ui}^2}{2\mu^2} - \frac{\rho V_{ui-1}^2}{2\mu^2}. \quad (15)$$

Враховуючи рівняння об'ємних витрат [7]:

$$Q_{vai} = fV_i = f_u V_{ui}, \quad (16)$$

де f_u – площа прохідного перетину штуцера, м^2 ;

V_{ui} – швидкість повітряного потоку в i -ому штуцері, м/с;

Q_{vai} – витрати повітря в i -ому висівному апараті, м³/с.

Відповідно виразу (11), маємо:

$$V_{ui} = \frac{F}{f_u} (V_{pi} - V_{pi-1}), \quad V_{ui-1} = \frac{F}{f_u} (V_{pi-1} - V_{pi-2}) \quad (17)$$

Підставляючи (17) в (15) отримаємо:

$$p_{i-1} - p_i = \frac{\rho F^2}{2\mu^2 f_u^2} [(V_{pi} - V_{pi-1})^2 - (V_{pi-1} - V_{pi-2})^2]. \quad (18)$$

Підставивши в рівняння (15) величину $p_{i-1} - p_i$ з (18) і враховуючи, що $l_0 = \frac{L}{(n-1)}$, після відповідних перетворень отримаємо значення швидкості повітряного потоку в перерізах ресивера:

$$V_{pi} = \frac{V_{pi-1} + \sqrt{V_{pi-1}^2 - \left(1 - \frac{2\mu^2 f_u^2}{F^2}\right) \left[\frac{\mu^2 f_u^2}{F^2} \left(2 - \frac{\lambda_{pi-1} L}{(n-1) D_e}\right) V_{pi-1}^2 + 2V_{pi-2} V_{pi-1} - V_{pi-2}^2 \right]}}{1 - \frac{2\mu^2 f_u^2}{F^2}}, \quad (19)$$

де D_e – еквівалентний діаметр ресивера, м;

L – загальна довжина ресивера, м;

$i=2, 3, 4, \dots, n/2$.

Під знаком радикалу взято знак плюс, оскільки завжди $V_{pi} > V_{pi-1}$.

Для визначення коефіцієнту витрат запишемо рівняння Бернуллі для ділянки $a-b$ (рис. 2):

$$p_a = p_i + \frac{\rho V_{ui}^2}{2} + \Delta p_{a-b}, \quad (20)$$

де $\Delta p_{a-b} = \Delta p_{vai} + \Delta p_{mpi} + \Delta p_{ex} + \Delta p_u$ – втрати тиску на ділянці $a-b$, Па.

тут $\Delta p_{vai} = \zeta \frac{\rho V_i^2}{2}$ – втрати тиску в i -ому висівному апараті, Па;

$\Delta p_{mpi} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho V_i^2}{2}$ – втрати тиску в i -ому повітропроводі, Па;

$\Delta p_{exi} = \zeta_{ex} \frac{\rho V_{ui}^2}{2}$ – втрати при вході в штуцер, Па,

$\Delta p_u = \lambda_u \frac{l_u}{d_u} \frac{\rho V_{ui}^2}{2}$ – втрати тиску в штуцері, Па;

l – довжина повітропроводу, м;

d – прохідний діаметр повітропроводу, м;

$\zeta_{ex} = 0,5 \left(1 - \frac{f_u}{f}\right)^{3/4}$ – коефіцієнт місцевого опору миттєвому звужуванню [9];

де λ_u – коефіцієнт гідравлічного опору штуцера;

l_u – довжина штуцера, м;

d_u – похідний діаметр штуцера, м ($d_u = d_{omei} = const$).

Тобто, враховуючи рівняння об'ємних витрат (16), втрати Δp_{a-b} можна представити в наступному вигляді:

$$\Delta p_{a-b} = \left[\left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{f_u^2}{f^2} + 0,5 \left(1 - \frac{f_u}{f} \right)^{3/4} + \lambda_{uu} \frac{l_{uu}}{d_{uu}} \right] \frac{\rho V_u^2}{2}. \quad (21)$$

Використовуючи (14), (20) та (21) після перетворень отримаємо:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{f_u^2}{f^2} + 0,5 \left(1 - \frac{f_u}{f} \right)^{3/4} + \lambda_{uu} \frac{l_{uu}}{d_{uu}}}}. \quad (22)$$

Підставляючи значення коефіцієнту витрат (22) в (19), отримаємо формулу для визначення швидкості повітряного потоку в i -ому перерізі ресивера:

$$V_{pi} = \frac{V_{pi-1} + \sqrt{V_{pi-1}^2 - (1-2B) \left[B \left(2 - \frac{\lambda_{pi-1} L}{(n-1) D_s} \right) V_{pi-1}^2 + 2V_{pi-2} V_{pi-1} - V_{pi-2}^2 \right]}}{1-2B}, \quad (23)$$

$$\text{де } B = \frac{\left(\frac{f_u}{F} \right)^2}{1 + \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{f_u^2}{f^2} + 0,5 \left(1 - \frac{f_u}{f} \right)^{3/4} + \lambda_{uu} \frac{l_{uu}}{d_{uu}}}.$$

Припускаючи $i=2$, та враховуючи, що $V_0=0$, отримаємо:

$$V_{p2} = C_2 V_{p1}, \quad (24)$$

$$\text{де } C_2 = \frac{1 + \sqrt{1 - (1-2B) B \left(2 - \frac{\lambda_{pi-1} L}{(n-1) D_s} \right)}}{1-2B}.$$

Припускаючи $i=3$ і підставляючи $V_{p2}=C_2 V_{p1}$, знаходимо $V_{p3}=C_3 V_{p1}$. Далі, припускаючи $i=4, 5, 6, \dots, n/2$, отримаємо:

$$V_{pi} = C_i V_{p1}, \quad (25)$$

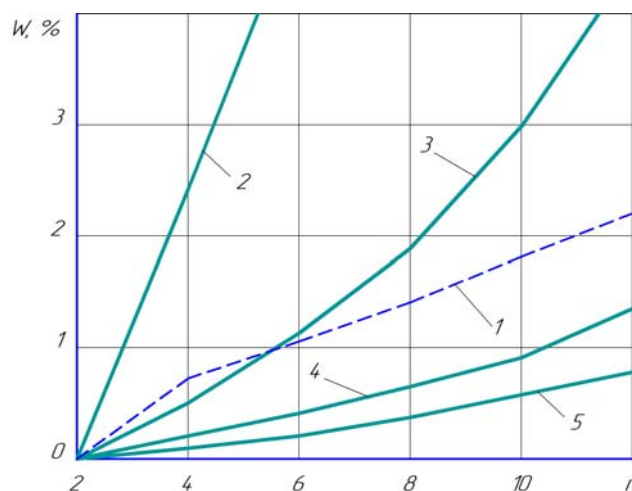
$$\text{де } C_i = \frac{C_{i-1} + \sqrt{C_{i-1}^2 - (1-2B) \left[B \left(2 - \frac{\lambda_{pi-1} L}{(n-1) D_e} \right) C_{i-1}^2 + 2C_{i-1} C_{i-2} - C_{i-2}^2 \right]}}{1-2B},$$

тут $C_0=0$; $C_1=1$; $i=2, 3, 4, \dots, n/2$.

Підставляючи в (12) значення V_{pi} з (25), отримаємо вираз для визначення коефіцієнту варіації рівня розрідження в вакуумних камерах висівних апаратів по ширині захвату сівалки з ресивером:

$$W = \frac{n \sum_{i=1}^{n/2} (C_i - C_{i-1})^4}{\sqrt{2 \left[\sum_{i=1}^{n/2} (C_i - C_{i-1})^2 \right]^2}} - 1 \cdot 100. \quad (26)$$

При проведенні розрахунків за формулами (3.20) та (3.50) коефіцієнт гідравлічного опору висівного апарата ζ приймався за рекомендаціями [10]. За результатами розрахунків побудовані графіки залежності $W=f(n)$ для кукурудзяної сівалки (рис. 3).



1 – сіялка з колектором; 2 – $D_e=40$ мм; 3 – $D_e=60$ мм; 4 – $D_e=80$ мм; 5 – $D_e=100$ мм

Рисунок 3 – Нерівномірність розріджень по ширині захвату кукурудзяних сіялок
Джерело: розроблено автором

Аналіз залежностей показує, що при збільшенні рядності сіялок збільшується і нерівномірність розріджень в висівних апаратах, яка приводить до нерівномірності висіву насіння.

Для сіялок з колектором це пояснюється тим, що при збільшенні рядності зростає варіація довжин повітропроводів та втрат тиску в них. При цьому збільшення коефіцієнту варіації нерівномірності розрідження спостерігається при зменшенні коефіцієнту гідравлічного опору висівного апарата, оскільки його значення стає співвимірним з коефіцієнтом гідравлічного опору і нерівномірність довжин повітропроводів ще в більшій мірі відбивається на рівномірності відбору повітря з кожного апарата. При збільшенні коефіцієнту вплив нерівномірності довжин повітропроводів послаблюється внаслідок зменшення долі опору повітропроводів в загальному опорі пневматичної системи.

Для сіялок з ресивером зі збільшенням рядності зростає варіація рівня розрідження в ресивері, яка приводить до нерівномірності розріджень в висівних апаратах. При цьому зниження коефіцієнту варіації спостерігається при збільшенні діаметра ресивера та збільшенні коефіцієнту гідравлічного опору висівного апарата. Виявлена залежність знаходить своє фізичне пояснення в тому, що збільшення площі прохідного перерізу ресивера та зниження витрат повітря в висівному апараті призводить до зменшення швидкості V_p , забезпечуючи зменшення величини приєднаних в результаті надходження повітря з висівних апаратів динамічних тисків від периферії ресивера до його центру. Тому статичний тиск по всій довжині ресивера вирівнюється.

Висновки. Аналіз отриманих залежностей показує, що сіялки з ресивером діаметром більше 70-80 мм по характеру відбору повітря з висівних апаратів мають переваги перед сіялками з колектором. При збільшенні прохідного діаметра ресивера ця перевага стає більш помітною.

Список літератури

1. Процеси, машини та обладнання АПВ : навч. посіб. / М.О Свірень., В.П. Смірнов, І.М. Осипов та ін. ; за ред. М.І. Черновола. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2015. 296 с.
2. Сільськогосподарські машини : підручник / Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. Д.Г. Войтюка. К. : Агроосвіта, 2015. 679 с.

3. Данильченко М.Г. Сільськогосподарські машини. Тернопіль: Економічна думка, 2011. 272 с.
4. Осипов І.М., Сисоліна І.П. Обґрунтування параметрів повітророзподільника просапних сівалок. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 40-44.
5. Опря А. Т. Статистика : навч. посіб. К.: Центр учбової літератури, 2012. 448 с.
6. Возняк Л.В., Гімер П.Р., Мердх М.І., Паневник О.В. Гідравліка : навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. 327 с.
7. Макаренко Р.О., Коваль О.Д., Хлистун О.І. Гідрогазомеханіка : навч. посіб. К.: НАУ, 2016. 220 с.
8. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Примежовий шар та нев'язкі течії : навч. посіб. К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2013. 210 с.
9. Аврахов Ф.І., Кудінов П.І., Приходько О.А., Сяєв В.О. Лабораторний практикум з аерогідромеханіки та гідравліки : навч. посіб. Д.: РВВ ДДУ, 2000. 96 с.
10. Осипов І.М., Амосов В.В., Абрамова В.А. Аеродинамічні дослідження висівного апарата сівалок УПС. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 36. С. 41-43.

References

1. Sviren, M.O., Smirnov, V.P., Osypov, I.M. et al. (2015). *Procesy, mašyny ta obladnannja ahrpromysloвого vyrobnytva* [Processes, machines and equipment of agro-industrial production]. Kropyvnytskyi: [in Ukrainian].
2. Voitiuk, D.H., Aniskevych, L.V., Ishchenko, V.V. et al. (2015). *Silskohospodarski mashyny* [Agricultural machinery]. Kyiv: [in Ukrainian].
3. Danyl'chenko, M.G. (2011). *Sil's'kogospodars'ki mashyny* [Agricultural machinery]. Ternopil: [in Ukrainian].
4. Osypov, I.M. & Sysolina, I.P. (2015). Obhruntuvannja parametriv povitrorozpodil'nyka prosapnyx sivalok [Substantiation of parameters of the air distributor of row seeders]. *Visnyk Ukrajins'koho viddilennja Mižnarodnoji akademiji ahrarnoji osvity – Bulletin of the Ukrainian branch of the International Academy of Agrarian Education, Vol. 3*, 40-44 [in Ukrainian].
5. Oprja, A. T. (2012). *Statistica* [Statistics]. Kyiv [in Ukrainian].
6. Voznjak, L.V., Himer, P.R., Merdux, M.I. & Panevnyk, O.V. (2012). *Hidravlika* [Hydraulics]. Ivano-Frankivsk: [in Ukrainian].
7. Makarenko, R.O., Koval', O.D. & Xlystun, O.I. (2016). *Hidrohaezomexanika* [Hydrogas mechanics]. Kyiv: [in Ukrainian].
8. Kalion, V.A. (2013). *Občysljuval'na hidromexanika. Prymezhovyi shar ta neviazki techii* [Computational hydromechanics. Boundary layer and incoherent currents]. K. : Vydavnycho-polihrafichnyj tsentr "Kyivs'kyj universytet" [in Ukrainian].
9. Avraxov, F.I., Kudinov, P.I., Pryhod'ko, O.A. & Sjasjev, V.O. (2000). *Laboratornyj praktykum z aeroxidromexaniky ta hidravliky* [Laboratory workshop on aeroxidromechanics and hydraulics]. Donetsk [in Ukrainian].
10. Osypov, I.M., Amosov, V.V. & Abramova, V.A. (2006). Aerodynamični doslidžennja vysivnoho aparata sivalok UPS [Aerodynamic researches of the sowing device of UPS seeders]. *Konstrujuvannja, vyrobnytvo ta ekspluatacija sil's'kogospodars'kix mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 36*, 41-43 [in Ukrainian].

Ihor Osypov, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Substantiation of the Type of Air Switchgear of Pneumomechanical Seed Drills

Fulfillment of requirements of agrotechnics on uniformity of distribution of seeds on the area of feeding completely depends on the correct choice of a design of sowing system.

Promising development of designs of row seeders is the use of pneumatic sowing systems, which is a prerequisite for increasing productivity and reducing direct costs during sowing. But, in some cases, such a technical solution leads to an increase in metal consumption of drills, complicates their maintenance. The costs of production and operation of such drills become unjustified.

Various types of air switchgears are used to select air from sowing machines in vacuum pneumatic sowing systems and to distribute it over sowing machines in pneumatic sowing systems of excess pressure.

Recently, in the designs of most pneumatic seeding systems of domestic and foreign drills used receiver, which has the form of a pipe, the inner cavity of which is connected to the fan. Air ducts of the same length connected to the sowing machines are adjacent to the outer side surface of the receiver. The use of the receiver

simplifies the design of the pneumatic seeding system, eliminates the difference in the lengths of the air ducts and reduces their length, which eliminates their inflections in the process of the drill.

The conducted researches allowed to establish the dependences, the analysis of which showed that with increasing the number of seeders the unevenness of the differences in the sowing machines increases, which leads to the unevenness of sowing the seeds.

For drills with a collector, this is explained by the fact that with increasing uniformity, the variation of air duct lengths and pressure losses in them increases. In this case, an increase in the coefficient of variation of the non-uniformity of propagation is observed when the coefficient of hydraulic resistance of the sowing machine decreases, since its value becomes comparable with the coefficient of hydraulic resistance and the non-uniformity of lengths. As the coefficient increases, the effect of the unevenness of the air duct lengths weakens due to the decrease in the fraction of air duct resistance in the total resistance of the pneumatic system.

For drills with a receiver, the variation in the level of rarefaction in the receiver increases with increasing uniformity, which leads to uneven distribution in the sowing machines. At the same time, a decrease in the coefficient of variation is observed with an increase in the diameter of the receiver and an increase in the coefficient of hydraulic resistance of the sowing machine. The revealed dependence finds its physical explanation in the fact that the increase in the cross-sectional area of the receiver and the reduction of air flow in the seeder leads to a decrease in air flow rate in the receiver, providing a decrease in the amount of air connected to the. Therefore, the static pressure along the entire length of the receiver is equalized.

The analysis of dependences also shows that seeders with a receiver with a diameter of more than 70-80 mm have advantages over seeders with a collector in terms of air selection from seed drills. As the previous diameter of the receiver increases, this advantage becomes even more noticeable.

receiver, pneumomechanical seed drill, drill, vacuum chamber, air flow, vacuum, pressure loss, hydraulic resistance

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.363.2

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.107-113>

Р.В. Кісільов, доц., канд. техн. наук, **В.С. Хмельовський**, доц., д-р техн. наук, **П.Г. Лузан**, доц., канд. техн. наук, **І.П. Сисоліна**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: ruslan_vik@ukr.net

Дослідження двосекційного змішувача для приготування збалансованих сумішей на фермах ВРХ

У статті на підставі проведено аналізу існуючих конструкцій запропоновано нову схему двосекційного стрічково-лопатевого змішувача. Експериментальні дослідження визначили вплив конструктивних і режимних параметрів на якість приготування кормосуміші для великої рогатої худоби. Визначена область раціональних значень при яких досягається максимальна однорідність суміші. Отримано графічні залежності, які характеризують якісну роботу двосекційного комбінованого змішувача кормів.

змішувач кормів, корми, тваринництво, однорідність суміші, кормосуміш, зоотехнічні вимоги

Р.В. Кисилев, доц., канд. техн. наук, **В.С. Хмелевский**, доц., д-р техн. наук, **П.Г. Лузан**, доц., канд. техн. наук, **И.П. Сысолина**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Исследование двухсекционного смесителя для приготовления сбалансированных смесей на фермах КРС

В статье на основании проведения анализа существующих конструкций предложена новая схема двухсекционного ленточно-лопастного смесителя. Экспериментальные исследования определили влияние конструктивных и режимных параметров на качество приготовления кормосмеси для крупного рогатого скота. Определена область рациональных значений при которых достигается максимальная однородность смеси. Получены графические зависимости, характеризующие качественную работу двухсекционного комбинированного смесителя кормов.

смеситель кормов, корма, животноводство, однородность смеси, кормосмеси, зоотехнические требования

Постановка проблеми. Молочне та м'ясне скотарство України є однією з провідних і найбільш важливих галузей тваринництва, яка забезпечує виробництво більше 95% коров'ячого молока і 50...60% яловичини. На світовому ринку попит на високоякісне молоко, яловичину і продукти їх переробки постійно зростає і тому має важливе господарське значення для розвитку галузі скотарства у сільськогосподарському виробництві нашої країни.

В загальному процесі виробництва продукції скотарства визначальна роль належить кормам. Вони мають низьку якість, в більшості випадків ще й виробляється недостатня кількість, а доля їх у собівартості молока та яловичини становить більше половини витрат [1, 3, 5].

Змішування кормів є обов'язковою і найважливішою та складовою ланкою в процесі приготування збалансованих кормових сумішей, задача якої – одержання встановлених стандартами кондицій за однорідністю, структурою, фізико-механічними властивостями і суворо встановленою кількістю кожного компонента за рецептом.. Порушення співвідношення кормів в суміші призводить до зниження або підвищення поживності готового корму, а в кінцевому рахунку до перевитрат кормів і недобору продукції. В зв'язку з цим в Україні і закордоном існує велика кількість різних змішувачів. В основу їх класифікації прийняті основні істотні ознаки, які мають характерні конструктивно-технологічні схеми, а саме за фізичним станом перемішувального середовища та способом дії і характером технологічного процесу.

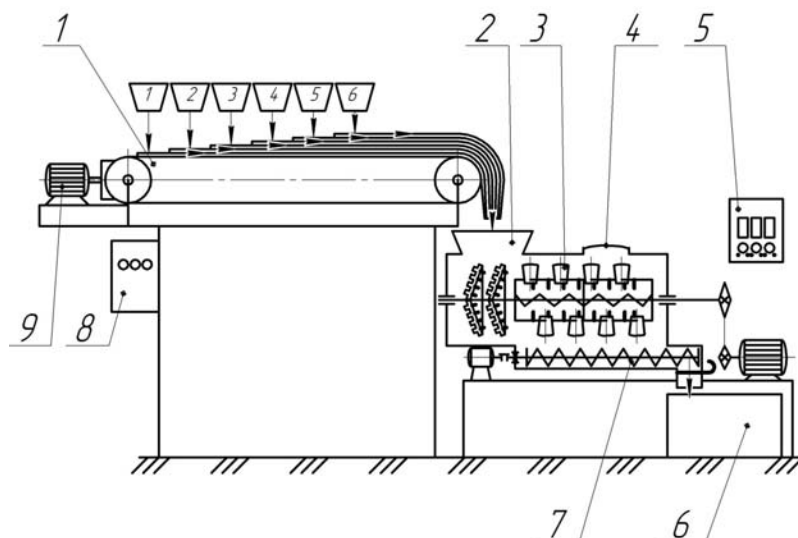
Аналіз конструкцій змішувачів кормів для великої рогатої худоби (ВРХ) виявив ряд недоліків. Це великі енергетичні витрати, мають високу питому матеріалоемність та не повністю забезпечують зоотехнічні вимоги щодо якісного показника (однорідності суміші на рівні 86%). Наявні недоліки роботи традиційних змішувачів обмежують їх застосування на фермах ВРХ, а використання у потокових лініях малоефективне, тому питання підвищення ефективності функціонування і технічного рівня змішувачів для приготування вологих кормосумішей є актуальною задачею. Для інтенсифікації процесу і підвищення ефективності приготування повнораціонних вологих кормових сумішей є поліпшення технологічного процесу шляхом підвищення його динамічності і технічного рівня змішувачів з застосуванням комбінованих конструкцій мішалок та дослідженням впливу конструктивно-кінематичних параметрів на підвищення технологічної ефективності технологічної ефективності змішування вологих кормів [2, 4, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням процесу сумішоутворення займалися відомі вчені: Кукта Г.М., Гейфман В.П., Завражнов А.І., Кулаковський І.В., Резнік Є.І., Корольов К.М., Лобановський Г.А., Мельніков С.В., Мяндр А.Е., Макаров Ю.П., Сироватка В.І. та інші. Останні дослідження показують, що приготування збалансованої кормосуміші для годівлі ВРХ – це складний технологічний процес зі своїми істотними відмінностями. Тому в теоретичних і експериментальних

дослідженнях особливо важливого значення набуває фізико-механічна сторона процесу змішування кормів і математичне моделювання властивостей складних сипучих матеріалів [2, 4].

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності технології приготування повноцінних збалансованих кормосумішей для ВРХ шляхом інтенсифікації і динамічності процесу змішування із застосуванням двосекційних конструкцій стрічково-лопатевого змішувачів.

Виклад основного матеріалу. В зв'язку з поставленою проблемою для усунення недоліків в роботі традиційних змішувачів створена нова конструкція двосекційного комбінованого стрічково-лопатевого змішувача, випробування якого підтвердили його високу ефективність. Запропонований змішувач включає корпус з завантажувальною горловиною і вивантажувальним шнеком, вал, який встановлений в підшипникових опорах. Двоступеневе змішування кормів забезпечується гвинтовими периферійними лопатями з радіальними пальцями, які жорстко закріплені на валу за допомогою стійок та другою секцією периферійних плоских лопатей з правим і лівим кутом нахилу їх робочої поверхні до осі вала. Плоскі лопаті з відповідним кроком жорстко встановлені на опорах вздовж змішувача, які знизу обладнані радіальними пальцями для розрихлення моноліту суміші в корпусі змішувача. Мішалка з'єднується з механізмом привода за допомогою напівмуфти. Процес змішування кормів виконується таким чином. Під час роботи змішувача компоненти кормосуміші завантажуються пошарово транспортером 1 в бункер 2, де поступово вирівнюється їх потік і відбувається змішування гвинтовими стрічковими лопатями з пальцями й далі утворена суміш подається у багатосекційну мішалку з плоскими лопатями. Переміщення кормосуміші по поверхні лопатей з різним кутом нахилу в зоні інерційного руху здійснюється в режимі підвищеної динамічності процесу та збільшення зіткнень і перетинів в радіальному та осьовому напрямках, що визначається формою атакуючої лопаті, кроком розташування, геометричними розмірами та кінематичними режимами їх роботи (рис. 1).



1 - завантажувальний транспортер; 2 – бункер; 3 – мішалка з гвинтовими та плоскими лопатями; 4 – оглядовий люк; 5 – пульт управління змішувачем; 6 – ємкість готової кормової суміші; 7 – вивантажувальний шнек; 8 - пульт управління транспортером; 9 – двигун приводу транспортера

Рисунок 1 – Технологічна схема експериментального комбінованого стрічково-лопатевого двосекційного змішувача кормів

Джерело: розроблено авторами

Вал мішалки приводиться в дію від мотора - редуктора ланцюговою передачею. Регулювання частоти обертання мішалки здійснюється блоком зірочок з діапазоном частоти обертання 20 – 150 об/хв. Установка з вивантажувальним шнеком 7 і засувкою змонтована на металевій рамі.

Метою експериментальних досліджень передбачалось встановлення ідентифікації розроблених математичних моделей і адекватність отриманих результатів досліджень запропонованого змішувача кормів та визначення впливу основних параметрів і режимів його роботи на показники якості виконання процесу.

Для досягнення поставленої мети визначався взаємний вплив одночасної зміни частоти обертання вала мішалки, ширини плоскої лопаті, кута нахилу лопаті до осі вала мішалки і тривалості часу змішування кормів на показники якості виконання процесу: однорідність суміші і потужність приводу вала змішувача.

З урахуванням умов і режимів роботи експериментальної установки, досліджували неоднорідність отриманої суміші V_o (%) і витрати потужності приводу вала змішувача N (Вт) від зміни частоти обертання вала мішалки n (об/хв.), ширини плоскої лопаті b (мм), кута нахилу лопаті α (град.) та тривалості часу змішування кормів t (хв.), відповідно $Y_1 = V_o = f(n; b; \alpha; t)$ і $Y_2 = N = f(n; b; \alpha; t)$. При проведенні дослідів постійними були параметри мішалки: висота лопаті $h = 0,5 R_d$ (мм) та крок між суміжними парами лопатей $S = 0,7 R_d$ (мм).

Ступінь завершення процесу змішування кормів контролювали тривалістю часу змішування та аналізом відібраних проб. Технологічну якість суміші визначали шляхом розподілення контрольного компоненту в 10 пробах (маса проби 100 г з вмістом контрольного компоненту 20 шт. вирівняних насінин сої) [8]. Фракційний склад компонентів суміші відповідав стандартним вимогам до годівлі дійної групи корів (табл. 1).

Таблиця 1 – Фракційний склад подрібнених компонентів суміші, %

Розмір часток, мм			Сінаж	Силос	Солома	Конц-корми	Кормові буряки
1			2	3	4	5	6
Силос, сінаж, солома	Конц-корми	Кормові буряки					
до 10	до 1,0	до 15	65,8	3,4	58,8	12,2	85,76
10...30	1,0...1,5	15...30	23,4	17,3	31,3	61,4	10,59
30...50	1,5...1,7	більше 30	9,2	29,1	8,0	17,6	3,65
50...100	1,7...2,5	-	1,6	36,6	2,1	8,8	-
більше 100	-	-	-	13,6	-	-	-
Середньозважений розмір часток, мм			12,85	59,9	13,98	1,3	10,2

Джерело: Джерело: розроблено авторами

Експериментальні дослідження підтвердили перевагу в роботі двосекційного змішувача над односекційним за рахунок більш прискореного конвективного та дифузійного змішування в мікрооб'ємах корму. Тривалість часу змішування кормів

відбувається протягом 6...8 хв. і стабілізується при однорідності суміші на рівні 95...98%.

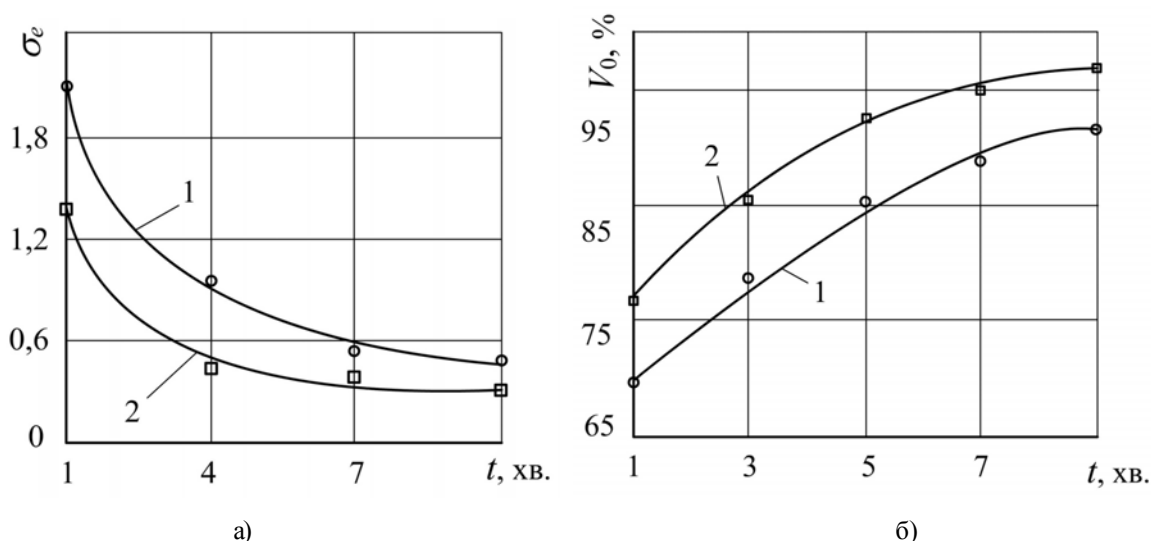


Рисунок 2 – Кінетика процесу а) та однорідність б) змішування кормів односекційною (1) і двосекційною (2) мішалкою при частоті обертання вала $n=80$ об/хв.

Джерело: Джерело: розроблено авторами

Крім того, було визначено, що мінімальна питома енергоємність процесу приготування суміші двоступеневим змішувачем складає $E = 0,65$ кВт·год/т при тривалості змішування 5 хв., кутовій швидкості руху вала мішалки $\omega = 8,0 \text{ c}^{-1}$, кутові нахилу лопатей $\alpha = 50^\circ$ і ширині лопатей $b = 0,4R_d$, а максимальна - $E = 1,16$ кВт·год/т при кутовій швидкості руху вала мішалки $\omega = 9,0 \text{ c}^{-1}$, кутові нахилу лопатей $\alpha = 45^\circ$, ширині лопатей $b = 0,45R_d$ і тривалості змішування кормів 8 хв. [10, 11].

Висновки. Проведені дослідження процесу змішування кормів та приготування збалансованої кормової суміші дозволили визначити раціональні конструктивні та режимні параметри розробленого двосекційного комбінованого змішувача. Запропонована конструкція змішувача забезпечує однорідність суміші $V_0=95\ldots98\%$ та необхідну технологічну ефективність і надійність виконання процесу з мінімальними витратами енергії, що відповідає діючим зоотехнічним вимогам ($V_0=90\ldots92\%$) до однорідності приготування повноцінних сумішей для ВРХ.

Список літератури

1. Кравчук В.І., Луценко М.М., Мечта М.П. Прогресивні технології заготівлі, приготування і роздавання кормів. Київ: Фенікс, 2008. 104 с.
2. Лазаревич А. П. Однотипові кормосуміші для молочної худоби. *Тваринництво України*. 2007. № 4. С. 33-35.
3. Adgidzi, D, A. Mu'azu, S. T. Olorunsogo and E.L. Shiawoya (2006). Design considerations of mixer-pelleting machine for processing animal feeds. 7th annual engineering conference, School of Engineering and Engineering Technology, FUT Minna. 28-30 June 2006. URL: [http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS\(1\)\(3\).pdf](http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf)
4. Хмельовський В.С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції*, Київ НУБІП України. 2017. С. 77-78. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77
5. Ревенко И., Ревенко Ю. Качество приготовления и эффективность использования концентрированных и комбинированных кормов. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow. 2013. Вип. 3.

- C. 356–361. URL: <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf>
6. Шевченко І.А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоєваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.*, 2013. Вип. 43. С. 179–185. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701>
7. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. Машина та обладнання для тваринництва. *Кондор*. Київ. 2009. 730 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/2085032/>
8. Шацький В.В., Мілько Д.А., Болтянський Б.В., Коломієць С.М., Семенцов В.І. Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. *Збірник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь. 2013. Вип. 1. т. 3. С. 43–50. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11SVVIAP.pdf>
9. Завражнов А.И. Механизация приготовления и хранения кормов. *Агропромиздат.*, 1990. 336 с.
10. Шацький В.В. Математическое моделирование динамичности плотности и качества кормовой смеси для животных. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: Мелітополь. 2012. Вип.2. Т.2. С. 3–19. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C2I1COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdusg_2014_144_32.pdf
11. Шабельник Б.П. Теорія та розрахунок машин для тваринництва. Монографія. Харків: ХДТУСГ, 2002, 216 с.

References

1. Kravchuk, V.I., Lutsenko, M.M. & Mechta, M.P. (2008). Prohresywni tekhnolohii zahotivli, pryhotuvannia i rozdavannia kormiv [*Progressive harvesting technologies, preparation and distribution of feed*]. Kyev: Feniks [in Ukrainian].
2. Lazarevych, A.P. (2007). Odnotypovi kormosumishi dlia molochnoi khudoby [Preparation of feed mixtures by the combined blender]. *Tvarynnystvo Ukrainy – Bulletin of Agricultural Science*, isse 4, 33–35 [in Ukrainian].
3. Adgidzi, D.A. Mu'azu, S.T. Olorunsogo & Shiawoya, E.L. (2006). Design considerations of mixer-pelleting machine for processing animal feeds. 7th annual engineering conference, School of Engineering and Engineering Technology, FUT Minna. 28-30 June 2006. Retrieved from [http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS\(1\)\(3\).pdf](http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf) [in English].
4. Khmel'ovs'kyj, V.S. (2017). Otsinka rivnomirnosti zmishuvannia kormiv. *Zbirnyk tez dopovidej XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 77–78), Kyiv NUBIP Ukrainy. Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77 [in Ukrainian].
5. Revenko I., Revenko Ju. (2013). Kachestvo prigotovlenija i jeffektivnost' ispol'zovanija koncentrirovannyh i kombinirovannyh kormov. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow. Vol. 3, pp. 356–361. Retrieved from <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf> [in Russian].
6. Shevchenko, I.A., Pavlichenko, V. M., Lykhodid, V. V. & Zabudchenko, V. M. (2013). Analiz konstruktivnykh tekhnichnykh zasobiv dlia vyrobnytstva volohykh vysokozasvoiuvannykh kormiv. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb.*, Vol. 43, 179–185. Retrieved from <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701> [in Ukrainian].
7. Revenko, I.I., Brahynets', M.V. & Rebenko, V.I. (2009). Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnystva. *Kondor*. Kyiv. Retrieved from <http://www.twirpx.com/file/2085032/> [in Ukrainian].
8. Shats'kyj, V.V., Mil'ko, D.A., Boltians'kyj, B.V., Kolomiets', S.M. & Sementsov, V.I. (2013). Yakist' zmishuvannia komponentiv ratsionu – osnova pidvyschennia produktyvnosti tvaryn. *Zbirnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnologichnoho universytetu*, Vol. 1, isse. 3, 43–50. Retrieved from <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11SVVIAP.pdf> [in Ukrainian].
9. Zavrazhnov, A.I. (1990). Mehanizacija prigotovlenija i hranenija kormov. *Agropromizdat* [in Russian].
10. Shackij, V.V. (2012). Matematicheskoe modelirovanie dinamichnosti plotnosti i kachestva kormovoj smesi dlia zhivotnyh. *Naukovij visnik Tavrijs'koho derzhavnogo agrotehnologichnoho universitetu: Melitopol'*, Vol.2. isse.2, 3–19. Retrieved from http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv

/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdtusg_2014_144_32.pdf [in Russian].

11. Shabel'nyk, B.P. (2002). *Teoriia ta rozrakhunok mashyn dlia tvarynnytstva*. Kharkiv: KhDTUSH [in Ukrainian].

Ruslan Kisilyov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasil Khmelevsky**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Petro Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Iryna Sysolina**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of a Two-section Mixer for the Preparation of Balanced Mixtures on Cattle Farms

Improving of livestock industry efficiency significantly depends on quality of feed preparation, as they are in cost structure of products are 30-60% of costs. Advanced technologies that allow to fully realize genetic potential of animals, due to the lack of necessary technical support have not become widespread.

The experience of using intensive full-system technologies for livestock production shows that, along with reliable and balanced provision of farms with high quality feeds, traditional feeding systems are being improved, which are aimed at the development of economically efficient mechanized feed processing technologies and the preparation of full-range and balanced feed mixtures.

Existing designs of feed mixers for cattle do not fully meet the zootechnical requirements for the preparation of multicomponent balanced complete feed mixtures, have high energy costs and high specific material consumption.

Therefore, research aimed at developing working bodies for feed mixers, which will ensure the creation of a highly efficient feed base at low energy and material costs are of economic importance and is an urgent scientific task.

In the article on the basis of the conducted researches the basic constructive-technological scheme of the effective single-shaft two-section mixer for realization of process of preparation of balanced mixes for cattle executed in the form of the horizontally located cylindrical case with the combined mixer consisting of section of screw tapes and flat blades (left and right) direction of inclination, the working surface of which is located at an angle of 45... 500 to the axis of the shaft and is equipped with radial fingers.

The purpose of experimental research was to establish identification of developed mathematical models and adequacy of research results of proposed feed mixer and determine impact of basic parameters and modes of its operation on quality process. Achieve this goal, mutual influence of simultaneous changes in speed of agitator shaft, width of flat blade angle of blade to axis of agitator shaft and duration of feed mixing on quality process: homogeneity of mixture and drive power of mixer shaft.

Theoretical studies of the process of preparation of a balanced complete ration mixture confirmed the advantage of the developed design of the combined two-section mixer and increased the quality index (homogeneity of the mixture) to 98%

feed mixer, feed, animal husbandry, mixture homogeneity, feed mixture, zootechnical requirements

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.365.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.114-121>**В.О. Швидя**, канд. техн. наук, **С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Україна**e-mail: Shvidia@gmail.com, e-mail: stepanenko_s@ukr.net*

Математичне моделювання процесу роботи сушильної камери баштової зерносушарки зі всмоктувальним повітряним потоком

У статті розроблено схему сушіння в баштовій зерносушарці, складені рівняння збереження енергії та матеріального балансу для зерна, рівняння масообміну й теплообміну між сушильним агентом та зерном. На їхній основі одержано аналітичні залежності зміни температури та вологості зерна, вологовмісту та температури сушильного агента вздовж і вшир сушильного каналу залежно від режимних параметрів (величини розрідження в сушильному каналі, швидкості руху зерна вздовж сушильного каналу, швидкості руху сушильного агента, початкових температур зерна та сушильного агента, початкової вологості зерна, а також початкового вологовмісту сушильного агента). Їх аналіз полегшує роботу у виборі раціонального режиму.

Розроблені аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння (вологість та температура зерна, вологовміст та температура сушильного агента) по довжині та ширині сушильного каналу в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком дають можливість зв'язати основні режимні параметри, що полегшує вибір раціональних режимів сушіння.

зерно, сушильний агент, баштова зерносушарка, сушильний канал, всмоктувальний повітряний потік, розрідження, режимні параметри зерносушарки.

В. О. Швидя, канд. техн. наук, **С. П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.*Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», пгт Глеваха, Украина*

Математическое моделирование процесса работы сушильной камеры башенной зерносушилки с всасывающим воздушным потоком

В статье разработана схема сушки в башенной зерносушилке, составлены уравнения сохранения энергии и материального баланса для зерна, уравнения массообмена и теплообмена между сушильным агентом и зерном. На их основе получены аналитические зависимости изменения температуры и влажности зерна, влагосодержания и температуры сушильного агента вдоль и вширь сушильного канала в зависимости от режимных параметров (величины разрежения в сушильном канале, скорости движения зерна вдоль сушильного канала, скорости движения сушильного агента, начальных температур зерна и сушильного агента, начальной влажности зерна, а также начального влагосодержания сушильного агента). Их анализ облегчает работу в выборе оптимального режима.

Разработанные аналитические зависимости изменения основных параметров сушки (влажность и температура зерна, влагосодержание и температура сушильного агента) по длине и ширине сушильного канала в башенных сушилках с всасывающим воздушным потоком дают возможность связать основные режимные параметры, что облегчает выбор рациональных режимов сушки.

зерно, сушильный агент, башенная зерносушилка, сушильный канал, всасывающий воздушный поток, разрежение, режимные параметры зерносушилки

Постановка проблеми. Технологічна операція сушіння є найбільш енерговитратною серед операцій післязбиральної обробки зерна. Вона дає можливість господарству забезпечити зберігання зібраного врожаю та покращити його якість. Для сушіння зерна в господарствах України переважно використовують шахтні, модульні, бункерні сушарки. Найбільшу якість й ефективність сушіння забезпечують шахтні сушарки. Оскільки в їхній конструкції використовуються повітророзподільні короби, то це збільшує металомісткість конструкції, а отже, й вартість. Тому в ринкових умовах на заміну шахтним сушаркам приходять баштові. У них відсутні повітророзподільні короби і сушильний агент надходить у зерновий шар із внутрішньої трубчастої частини до зовнішньої циліндричної, чи навпаки.

Використання всмоктувального повітряного потоку в баштових сушарках дає можливість підвищити їхню теплову ефективність та поліпшує екологічний стан навколо сушарки, оскільки всмоктування сприяє збиранню зернового пилу, що збільшує їхню конкурентоздатність на ринку. Для визначення раціональних режимів сушіння на даних сушарках необхідні надійні розрахункові формули, які визначають параметри сушіння за даними показників призначення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай у практиці конструювання зерносушарок [2–4, 11–14] розрахунок процесу сушіння зводиться до визначення експозиції сушіння для конкретного зерноматеріалу [3] з заданою продуктивністю, вхідними та вихідними параметрами сушарки витрат сушильного агента і витрат теплоти. Проте, випарна здатність сушарки не завжди збігається з випарною можливістю матеріалу. Але такі спрощені розрахунки не дають можливості аналізу та вибору найбільш придатних раціональних режимів сушіння. У дослідженнях [8–9] було розглянуто математичне моделювання шахтних сушарок. У науковій роботі [10] встановлено інтенсифікацію сушіння при використанні вакууму для сушіння насіння сільськогосподарських культур, також у роботі у загальній формі було обґрунтовано використання всмоктувального повітряного потоку [5, 11–14], але не описується його використання в конкретній конструкції сушарки.

Для практичного використання сушіння зі всмоктувальним повітряним потоком необхідна прив'язка до конкретної конструкції сушарки, що дасть можливість розрахувати необхідні параметри та порівняти з іншими технологіями.

Мета досліджень. Визначити аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком.

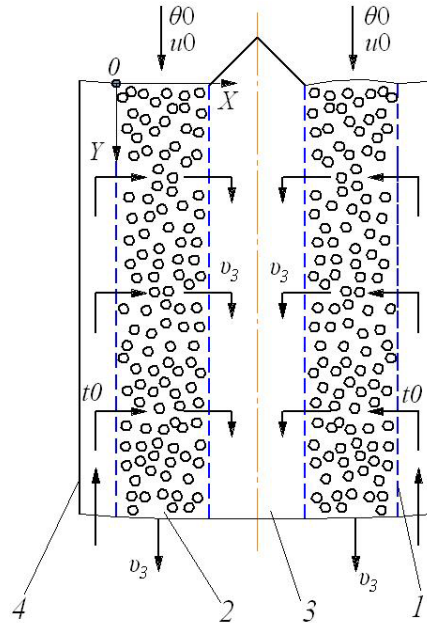
Методи досліджень. Використані рівняння збереження енергії та речовини, тепломасообміну. Застосовані основні положення теорії сушіння. Аналітичні залежності були одержані на основі розв'язку неоднорідних диференціальних рівнянь першого порядку та алгебраїчних рівнянь. Також використовувалися методи математичного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо схему роботи сушильної камери баштової сушарки зі всмоктувальним повітряним потоком (рис. 1).

Зерно з початковою температурою θ_0 та вологістю u_0 надходить у кільцевий сушильний канал 2, в якому через зовнішню циліндричну перфоровану стінку 1 в зерновий шар засмоктується сушильний агент від теплогенератора з початковою температурою t_0 . Сушильний агент, просочуючись через зерновий шар зі швидкістю v_c , віддає зерну теплову енергію й забирає з нього вологу. Відпрацьований сушильний агент засмоктується у внутрішній циліндричний канал 3. Зерно, рухаючись униз по сушильному кільцевому каналу зі швидкістю v_z , поступово нагрівається та висушується.

Рух сушильного агента перпендикулярно руху зерна обумовлений тим, що з метою зменшення аеродинамічного опору необхідно мінімізувати шлях сушильного

агента в зерні. Для керування сушильним процесом, схема якого показана на рисунку 1, необхідно знайти залежність вологості та температур зерна й сушильного агента вздовж і впоперек кільцевого сушильного каналу залежно від режимних параметрів і технологічних властивостей зерна. Для цього введемо декартову систему координат, початок якої поставимо на крайній верхній лівій точці кільцевого сушильного каналу 2. Вісь X направимо від зовнішньої циліндричної стінки 1 перпендикулярно до стінки внутрішнього перфорованого каналу 3. Вісь Y направимо вздовж зовнішньої циліндричної стінки 1 вниз.



1 – зовнішня перфорована циліндрична стінка сушильного каналу; 2 – кільцевий сушильний канал;
3 – внутрішній циліндричний перфорований канал; 4 – зовнішня повітронепроникна стінка башти.

Рисунок 1 – Схема роботи сушильної камери баштової зерносушарки:

Джерело: розроблено авторами

Під час моделювання будемо вважати, що технологічні параметри зерна та сушильного агента незмінні в часі, також введемо такі додаткові спрощення:

- швидкість переміщення зерна протягом руху однакова;
- втрати теплоти в довкілля не враховуються, їх можна визначити під час розрахунку витрат теплоти на сушіння;
- процес теплообміну відбувається за законом конвекції Ньютона, а видалення вологи з поверхні зерна – за законом Дальтона;
- внутрішній тепломасоперенос – безградієнтний, тобто температура на поверхні й усередині зернини однакова;
- розмір поверхонь нагріву та вологовидалення однаковий, а їхня різниця враховується коефіцієнтом масообміну, який віднесено до поверхні волого обміну.

З врахуванням прийнятих припущень для вибраної моделі баштової зерносушарки на основі аналізу балансів теплоти та маси між сушильним агентом і зерном складено наступні диференціальні рівняння:

- рівняння збереження енергії для зерна

$$\rho_3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot c_3 \cdot v_3 \cdot \frac{d\theta}{dy} + r_0 \cdot \rho_3 \cdot v_3 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{dU}{dy} = c_p \cdot \rho_c \cdot \varepsilon \cdot v_c \cdot \frac{dt}{dx}; \quad (1)$$
- рівняння теплообміну для сушильного агента (баланс теплоти)

$$\rho_c \cdot c_p \cdot \varepsilon \cdot v_c \cdot \frac{dt}{dx} = \alpha \cdot f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\theta - t); \quad (2)$$

- рівняння матеріального балансу для зерна

$$-\rho_z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot v_z \cdot \frac{dU}{dy} = \varepsilon \cdot \rho_c \cdot v_c \cdot \frac{dD}{dx}, \quad (3)$$

- рівняння масообміну

$$-\rho_z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot v_z \cdot \frac{dU}{dy} = f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \beta \cdot [P_z(\theta) - P_a(D)] \cdot \frac{r_0}{P}. \quad (4)$$

У рівняннях (1)–(4) позначено:

ρ_z, ρ_c – щільність зерна і густина сухого повітря, кг/м³;

ε – порозність зернового шару;

c_z, c_p – питомі теплоємності зерна і сушильного агента, Дж/кг·°C;

v_z, v_c – швидкість переміщення зерна і сушильного агента, м/с;

θ, t – температура зерна і сушильного агента, °C;

r_0 – питома теплота випаровування, Дж/кг;

U, D – вологовміст зерна і сушильного агента, відповідно, % та кг/кг с. р.;

x, y – ширина та висота зернового стовпа в процесі сушіння, м;

α, β – коефіцієнти теплообміну та масообміну, відповідно, Вт/м²·°C і кг/Па·с·м²;

f – питома поверхня зерна, м²/м³;

$P_z(\theta), P_a(D)$ – парціальний тиск водяної пари на поверхні нагрітого до температури θ зерна та в сушильному агенті, Па;

P_0, P – атмосферний тиск та розрідження в сушильній камері, Па.

Залежність парціального тиску вологи на поверхні зерна, яка дорівнює тиску насиченої пари за температури θ зерна можна апроксимувати лінійною залежністю:

$$P_z(\theta) = a \cdot \theta + c, \quad (5)$$

у сушильному агенті:

$$P_a(D) = b \cdot D, \quad (6)$$

де $a = 4,45$; $b = 1,14$; $c = -124$ – сталі емпіричні коефіцієнти [7].

Використовуючи визначення критерію Ребіндера [3] $R_b = \frac{c_z \cdot d\theta}{r_0 \cdot dU}$, зробимо в рівнянні (1) заміну:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{c_z}{r_0 \cdot R_b} \cdot \frac{d\theta}{dy}. \quad (7)$$

Після відповідних алгебраїчних перетворень рівнянь (1) та (2) одержимо:

$$\theta = t + A \cdot \frac{dt}{dx}; \quad (8)$$

$$t = \theta - B \cdot \frac{d\theta}{dy}, \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{\rho_c \cdot c_p \cdot \varepsilon \cdot v_c}{\alpha \cdot f \cdot (1 - \varepsilon)}, B = \frac{\rho_z \cdot c_z \cdot v_z \cdot (R_b - 1)}{\alpha \cdot f \cdot R_b}.$$

Розв'язок системи рівнянь (8) та (9) за граничних умов: $x = 0, y = 0, t = t_0, \theta = \theta_0$ (де t_0, θ_0 – температура сушильного агента і зерна на вході в сушарку) отримаємо у вигляді:

$$\theta(y) = [\theta_0 - t(x)] \cdot e^{-\frac{1}{B}y} + t(x); \quad (10)$$

$$t(x) = [t_0 - \theta(y)] \cdot e^{-\frac{1}{A}x} + \theta(y). \quad (11)$$

Вирішивши систему алгебраїчних рівнянь (10) і (11), отримаємо аналітичні залежності температури зерна та сушильного агента по ширині та довжині кільцевого сушильного агента залежно від режимних параметрів:

$$\theta(x, y) = \frac{t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - \theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y}}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}}; \quad (12)$$

$$t(x, y) = \frac{\theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y} \cdot \left(e^{-\frac{1}{A}x} - 1 \right) - t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x}}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}}. \quad (13)$$

Прирівнюючи рівняння (3) і (4), з урахуванням (5) та (6), матимемо:

$$\varepsilon \cdot \rho_c \cdot v_c \cdot \frac{dD}{dx} = f \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \beta \cdot (a \cdot \theta + c - b \cdot D) \cdot \frac{F_0}{F}. \quad (14)$$

Підставляючи значення θ з (12) в (14), після відповідних перетворень отримаємо рівняння:

$$A1 \cdot \frac{dD}{dx} + b \cdot D = \frac{a \cdot \left[t_0 \cdot e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - \theta_0 \cdot e^{-\frac{1}{B}y} \right]}{e^{-\frac{1}{A}x} \cdot \left(e^{-\frac{1}{B}y} - 1 \right) - e^{-\frac{1}{B}y}} + c, \quad (15)$$

$$\text{де } A1 = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot F}{\beta \cdot F_0 \cdot f \cdot (1 - \varepsilon)}.$$

Рівняння (15) є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Його рішення не може бути виражене через елементарні функції, тому воно представлено у вигляді нескінченного числового ряду, що сходиться. Рішення одержано за початкових умов: $x = 0$, $D = D_0$, де D_0 – вологовміст сушильного агента на вході в сушарку:

$$D(x, y) = T + e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot \{ D_0 - T - F1 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B}y} \right)^n}{n} \cdot [A1 - A \cdot b \cdot n] \cdot \left[1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x} \right] \}, \quad (16)$$

$$\text{де } T = \frac{a \cdot t_0 + c}{b}; F1 = \frac{A \cdot (t_0 + \theta_0 \cdot a)}{A1^2}.$$

Продиференціювавши рівняння (16) й підставивши отримане значення в рівняння (3), після перетворень матимемо:

$$-C1 \cdot \frac{dU}{dy} = -\frac{b}{A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot \{ D_0 - T - F1 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(1 - e^{-\frac{1}{B}y} \right)^n}{n \cdot A1 \cdot A} \cdot \left[A \cdot A1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x} \cdot (A \cdot b \cdot n^2 - n \cdot A1 - A \cdot A1) \right] \}. \quad (17)$$

Інтегрування рівняння (17) за початкових умов: $y = 0$, $U = U_0$ приводить до залежності:

$$U(x, y) = \frac{b}{C1 \cdot A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1}x} \cdot (D_0 - T) \cdot y + \\ + F1 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A \cdot A1 - e^{-\frac{n}{A \cdot A1} (A1 - A \cdot b \cdot n) x}}{n \cdot A1 \cdot A} \cdot (A \cdot b \cdot n^2 - n \cdot A1 - A \cdot A1) \cdot \frac{(-1)^n}{\Gamma(-n)} \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(k-n) \cdot \Gamma(-n)}{A \cdot \Gamma(k+1)} \cdot \left[1 - e^{-\frac{k-n}{A}y} \right] + U_0, \quad (18)$$

$$\text{де } C1 = \frac{\rho_1 \cdot (1-\varepsilon) \cdot v_3}{\rho_c \cdot v_c \cdot \varepsilon},$$

Γ – гамма-функція [6].

У практичних розрахунках нескінченні числові ряди в залежності (18) завжди мають кінцеву кількість членів, тоді різниця $k - n = 0$. Отже, в практичних розрахунках вираз (18) набуває такого вигляду:

$$U(x, y) = \frac{b}{C1 \cdot A1} \cdot e^{-\frac{b}{A1} x} \cdot (D0 - T) \cdot y + U0. \quad (19)$$

Отже, одержані залежності (12), (13), (16) і (19) дають можливість визначити режимні параметри сушіння (t , θ , D , U) в баштовій зерносушарці зі всмоктувальним повітряним потоком на виході, а також проаналізувати їх у будь-якій точці кільцевого сушильного каналу (рис. 1) та визначити раціональний режим (рис. 2).

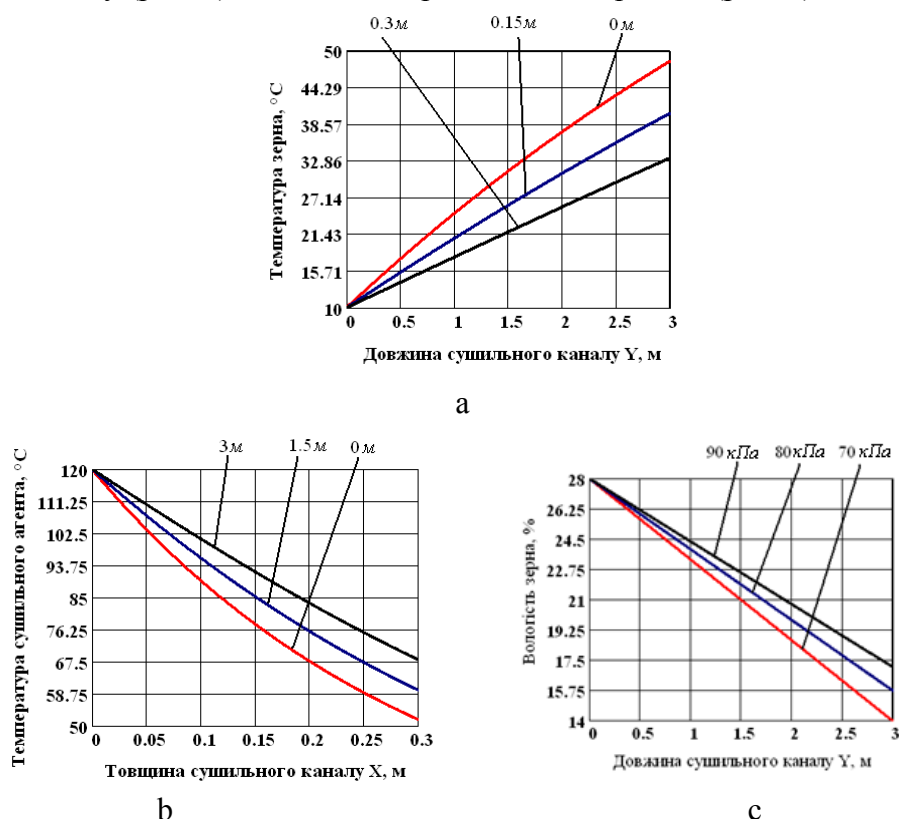


Рисунок 2 – Зміна температури (а) та вологості (с) зерна по довжині сушильного каналу на різній товщині та різному розрідженні; зміна температури сушильного агента (b) по товщині сушильного каналу на різній його довжині

Джерело: розроблено авторами

Зміною швидкості переміщення зерна v_3 вздовж сушильного каналу та швидкості продування зернового шару v_c сушильним агентом можливо досягти ізотермічного режиму сушіння.

Висновки. Розроблені аналітичні залежності зміни основних параметрів сушіння (вологість та температура зерна, вологовміст та температура сушильного агента) по довжині та ширині сушильного каналу в баштових сушарках зі всмоктувальним повітряним потоком дають можливість зв'язати основні режимні параметри, що полегшує вибір раціональних режимів сушіння.

Список літератури

1. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур / [колектив авторів]; за ред. В. І. Кравчука. Дослідницьке, 2011. 224 с.
2. Гапонюк О. І. Активне вентилування і сушіння зерна. Одеса, 2014. 325 с.
3. Гинзбург А. С. Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М., 1985. 336 с.
4. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, В. О. Швидя та ін. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 552 с.
5. Швидя В. О., Анеляк М. М., Степаненко С. П. Обґрунтування використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний зб.* 2017. Вип. № 6 (105). С. 81–86.
6. Waldschmidt M. Transcendence of Periods: The State of the Art. *Pure Appl. Math. Quart.* 2. 2006. Pp. 435–463. doi:10.4310/pamq.2006.v2.n2.a3.
7. Краусп Р. В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. Москва, 1975. 227 с.
8. Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Котов Б. І. Математична модель процесу сушіння з перехресним рухом зерна і сушильного агента при його секційному вводі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка.* 2019. Вип. 199. С. 75–83.
9. Котов Б. І., Степаненко С. П., Швидя В. О. Моделювання і розрахунок режимних параметрів зерносушарок періодичної дії. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* 2016. Вип. 34. С. 74–80.
10. Експериментальні дослідження режимів сушіння насіння зернових культур із високою вологістю в середовищі низького тиску / Роговський Й. Л. та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering.* Vol. 57, № 1/2019. P. 141 – 146.
11. Котов, Б. І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних сушарок сільськогосподарських матеріалів. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* 2016. Вип. 35. С. 64–72.
12. Котов, Б. І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Наближений метод розрахунку кінетики сушіння сільськогосподарських матеріалів у нерухомому шарі активним вентилуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК: Всеукр. наук.-техн. журнал.* 2016. Вип. 1(93). С. 48–51.
13. Котов Б.И., Степаненко С.П., Швидя В.А. Системно-проектный подход к управлению комплексом машин на току. *Труды Таврийского государственного агротехнологического университета.* 2012. Вип. 12, т. 5. С. 78–85 (Украина).
14. Степаненко С.П., Швидя В.О., Попадюк І.С. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства.* 2017. Вип.5(104). С.132–142.

References

1. *Mashyny, ahrehaty ta komplekсы dlia pisliazybral'noi obrobky i zberihannia zernovykh kul'tur* [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of grain crops]. (2011). (V. I. Kravchuk Ed.). Doslidnyts'ke [in Ukrainian].
2. Gaponyuk, O. I. (2014). *Aktyvne ventyliuvannia i sushinnia zerna* [Active ventilation and grain drying. Odessa] [in Ukrainian].
3. Ginzburg, A. S. (1985). *Raschjot i proektirovanie sushil'nyh ustanovok pishhevoj promyshlennosti* [Calculation and design of drying plants for the food industry]. Moscow [in Russian].
4. Kotov, B. , Stepanenko, S. , Shvidya, V. and et. al. (2017). *Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'iektakh pisliazybral'noi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia)* [Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling)]. Nizhin : Publisher PP Lisenko M. [in Ukrainian].
5. Shvydyda, V. O., Anelyak, M. M., Stepanenko, S. P. (2017). *Obgruntuvannia vykorystannia vsmoktuiuchoho povitrianoho potoku pry sushinni zerna* [Rationale for the use of suction air flow during grain drying]. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'nodержavnyi zb. – Mechanization and electrification of agriculture : a national collection*, 6 (105), 81–86 [in Ukrainian].
6. Waldschmidt, M. (2006). Transcendence of Periods: The State of the Art. *Pure Appl. Math. Quart.* 2, 435–463. doi:10.4310/pamq.2006.v2.n2.a3 [in English].

7. Krausp, R. V. (1975). *Avtomatizacija posleuborochnoj obrabotki zerna [Automation of post-harvest grain processing]*. Moscow [in Russian].
8. Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S. P., Shvydya, V. O., Kotov, B. I. (2019). Matematychna model' protsesu sushinnia z perekhresnym rukhom zerna i sushyl'noho ahenta pry joho sektsijnomu vvodi [Mathematical model of the drying process with cross-movement of grain and drying agent at its sectional input]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasylenka – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko*, 199, 75–83 [in Ukrainian].
9. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Shvydya, V. O. (2016). Modeliuvannia i rozrakhunok rezhymnykh parametriv zernosusharok periodychnoi dii [Modeling and calculation of regime parameters of batch grain dryers]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery*, 34, 74-80 [in Ukrainian].
10. Rohovs'kyi, Y. L., Tytova, L. L., Trokhanyak, V. Y. & et al. (2019). Eksperymental'ni doslidzhennia rezhymiv sushinnia nasinnia zernovykh kul'tur iz vysokoju volohistiu v seredovyschi nyz'koho tysku [Experimental studies of drying regimes of seeds of cereals with high humidity in low pressure environment]. *INMATEH - Agricultural Engineering, Vol. 57, № 1*, 141 – 146 [in Ukrainian].
11. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. & Shvydya, V. O. (2016). Vrakhuvannia rozpodilenosti parametriv pry modeliuvanni dynamichnykh susharok sil's'kohospodars'kykh materialiv [Considering the distributed account settings at modeling dryers dynamic agricultural materials]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery*, 35, 64–72 [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I., Stepanenko, S.P., Shvydya, V. O. (2016). Nablyzhenyj metod rozrakhunku kinetyky sushinnia sil's'kohospodars'kykh materialiv u nerukhomomu shari aktyvnym ventyliuvanniam [An approximate method for calculating the kinetics of drying of agricultural materials in a fixed bed by active ventilation]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK: Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal – Technology, energy, transport agro-industrial complex: All-Ukrainian scientific and technical journal, Issue. 1 (93)*, 48-51 [in Ukrainian].
13. Kotov, B. I., Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. (2012). Sistemno-proektnyj podhod k upravlenniu kompleksom mashin na toku [System-design approach to the management of a complex of machines on current]. *Proceedings of the Tavriya State Agrotechnological University – Trudy Tavrijskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta, Issue. 12, Vol. 5*, 78–85 [in Ukrainian].
14. Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. & Popadyuk, I.S. (2017). Analiz rozvytku konstruksij pnevmoseparuiuchykh system separatoriv [Analiz rozvytku konstruksiy pnevmoseparuyuchykh system separatoriv]. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva – Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva, №.5(104)*, 132–142 [in Ukrainian].

Viktor Shvidia, PhD tech. sci., **Serhii Stepanenko**, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center “Institute of Agricultural Mechanization and Electrification”, Glevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Process of Operation of the Drying Chamber of a Tower Grain Dryer With a Suction Air Flow

In the article, a drying scheme in a tower grain dryer has been developed, equations for the conservation of energy and material balance for grain, equations for mass transfer and heat transfer between the drying agent and grain have been drawn up. On their basis, analytical dependences of changes in the temperature and moisture content of grain, moisture content and temperature of the drying agent along and in the width of the drying channel were obtained, depending on the operating parameters (the value of rarefaction in the drying channel, the speed of grain movement along the drying channel, the speed of movement of the drying agent, the initial temperatures of the grain and drying agent, initial moisture content of grain, as well as initial moisture content of drying agent). Their analysis facilitates the work in choosing the optimal mode.

The developed analytical dependences of changes in the main drying parameters (moisture and temperature of grain, moisture content and temperature of the drying agent) along the length and width of the drying channel in tower dryers with suction air flow make it possible to link the main operating parameters, which facilitate the choice of rational drying modes.

grain, drying agent, tower grain dryer, drying channel, suction air flow, vacuum, operating parameters of the grain dryer

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.632.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.122-133>**С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Україна**e-mail: stepanenko_s@ukr.net***Б.І. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна*

Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку

В статті розглядається підвищення ефективності поділу зернових матеріалів у пневматичних вертикальних каналах, шляхом визначення раціональної форми та параметрів подачі матеріалу, а також геометричної форми пневматичного каналу та варіантів поділу на фракції.

Отримано закономірності зміни траєкторії та швидкості руху матеріалу в пневматичних вертикальних каналах круглого перетину з нижнім вивантаженням матеріалу. Закономірності руху частинок у вигляді матеріальної точки визначили з урахуванням сил опору повітря, сил тертя, сил Магнуса та Жуковського, вологості та густини матеріалу на основі теоретичного вивчення процесу фракціонування зернового матеріалу в пневматичних вертикальних каналах.

Використовуючи запропоновані залежності для проектування повітряних сепараторів, можна визначити початкову швидкість введення і напрямок входження зернівок у повітряний потік, що є початковими умовами для визначення траєкторії руху матеріалу в повітряних каналах з нижнім вивантаженням матеріалу.

потік повітря, зерновий матеріал, сили Магнуса та Жуковського, змінна швидкість повітря, траєкторія, процес фракціонування, повітряний сепаратор

С.П. Степаненко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.*Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», пгт Глеваха, Украина***Б.И. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подольский государственный аграрно-технический университет, г. Каменец-Подольский, Украина*

Основные теоретические положения сепарации зернового материала в воздушном канале с неравномерной скоростью воздушного потока

В статье рассматривается повышение эффективности разделения зерновых материалов в пневматических вертикальных каналах, путем определения рациональной формы и параметров подачи материала, а также геометрической формы пневматического канала и вариантов разделения на фракции.

Получены закономерности изменения траектории и скорости движения материала в пневматических вертикальных каналах круглого сечения с нижней выгрузкой материала. Закономерности движения частиц в виде материальной точки определили с учетом сил сопротивления воздуха, сил трения, сил Магнуса и Жуковского, влажности и плотности материала на основе теоретического изучения процесса фракционирования зернового материала в пневматических вертикальных каналах.

Используя предложенные зависимости для проектирования воздушных сепараторов, можно определить начальную скорость ввода и направление входения зерновок в воздушный поток, которые являются исходными условиями для определения траектории движения материала в воздушных каналах с нижней выгрузкой материала.

поток воздуха, зерновой материал, силы Магнуса и Жуковского, переменная скорость воздуха, траектория, процесс фракционирования, воздушный сепаратор

Постановка проблеми. Повітряне або пневматичне сепарування (поділ) компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями (які досить тісно корелюються з біологічними особливостями зерна) використовують в багатьох типах сепаруючих і зерноочисних машин. Використовуються наступні способи розділення компонентів зернових матеріалів на фракції в повітряних потоках:

- пневмогравітаційна сепарація у вертикальних повітряних каналах;
- аеродинамічна сепарація в нахилених і горизонтальних повітряних каналах;
- пневмоінерційна сепарація в горизонтальних нахилених і вертикальних каналах з відцентровою подачею матеріалу.

Усі перераховані способи повітряної сепарації зернового матеріалу (ЗМ) оснований на різниці опору, що чинять окремі частинки ЗМ у повітряному потоці. Така протидія зумовлена фізико-механічними особливостями окремих частинок, які в нашому випадку характеризують їхні аеродинамічні властивості.

Основою розрахунків всіх способів повітряної сепарації є траєкторний аналіз, тобто побудова траєкторій переміщення частинок з різними аеродинамічними властивостями в каналах пневморозділяючих системи. Але розрахунки траєкторії виконуються, як правило, за спрощеною схемою враховуючи дію на частинки тільки двох сил-аеродинамічного опору та тяжіння, і при цьому, розглядається тільки рівномірний повітряний потік. Такі спрощення не відтворюють реальний фізико-механічний процес силової взаємодії частинок з повітряним потоком, який в пневмоканалах має суттєво нерівномірну епюру швидкості в поперечному перетині. Наявність нерівномірності поля швидкості повітря зумовлює виникнення додаткових поперечних сил, що діють на частинки. Оскільки критерієм ефективності поділу зернового матеріалу в каналах є величина розщеплення (відхилення) траєкторії компонентів ЗМ, то використання спрощених методів в їх розрахунку не дає можливості правильно визначити і оцінити ефективність конструкції пневмосепаратора та режиму його функціонування.

На сьогодні є достатньо даних, щодо впливу нерівномірності швидкості повітря в каналі і дії біякових сил на траєкторії руху компонентів зернового матеріалу (КЗМ). Запропоновані схеми пневмосепараторів із штучною (керованою) зміною швидкості повітря за координатою та в часі. Для виявлення і оцінки способів підвищення ефективності поділу КЗМ за аеродинамічними властивостями необхідно мати більш точний математичний опис процесу руху частинок в нерівномірних повітряних потоках.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Основи математичного опису процесу переміщення частинки (як матеріальної точки) в середовищі (повітряному) з опором закладено в роботах Васеленка П.М. [1-2], Заїки П.М. [3], в нахиленому потоці, Гортинського В.В із співавторами [4], у вертикальному потоці. Процеси повітряної сепарації висвітлені у фундаментальних роботах [5-6]. Деталізоване визначення величини бокових сил типу Магнуса і Жуковського і оцінено їх вплив на рух частинки в пневмоканалі в роботі Зуєва Ф.Г. [7-8].

В роботі [9], розглянута математична модель руху частинки у вертикальному каналі з нерівномірним по перченому перетині потоком повітря. В роботі [10], визначено негативний вплив нерівномірності потоку повітря на розходження траєкторій руху КЗМ. В роботі Абдуєва М.М. [11], розглянуто дію штучно сформовано епіри швидкості повітря (зміна швидкості повітря за висотою поперечного перетину нахиленого каналу. В роботі [12], реалізовано зміну швидкості за висотою каналу в напрямку руху потоку повітря. В роботах [13], сформульовано математичні моделі переміщення частинок КЗМ в канал при зміні швидкості повітря за координатами. Але у всіх останніх публікаціях розглянуто процес переміщення частинок в рівномірному за

площею поперечного перетину каналів потоці повітря і відповідно дія бокових сил не враховується. В роботі [14], дію сил Магнуса і Жуковського враховано при визначенні осідання краплі в поперечному потоці без врахування кута вводу краплі.

Постановка завдання. Формулювання математичного опису процесу переміщення частинки в повітряних каналах за наявності нерівномірної епюри швидкості повітря і дії бокових не керованих сил, частинки зернового матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо плоский повітряний канал з паралельними стінками розміщений до горизонту, як найбільш використовується варіант виконання пневмосепаратора (пневногравітаційного типу) який найбільш досліджений експериментально на різних видах насіннєвого матеріалу [4, 5, 6, 10, 12, 23]. Схема сил і швидкостей, діючих на частину наведена на рис. 1. При складанні математичного опису переміщення частинки (представленою матеріальною точкою з масою m та еквівалентним діаметром d) за схемою [1, 2, 4, 8, 11, 14, 16, 21, 22, 24], прийнято наступні припущення: ідеалізуючи реальний процес частинка не взаємодіє з іншими частинками і стінками каналу; рух повітряного потоку встановлений (стаціонарний); швидкість повітря розподілена в поперечному каналі і в напрямку руху не змінюється; аеродинамічні властивості частинки визначають коефіцієнтом вітрильності $k_B = g/v_{\text{внт}}^2$, (де $v_{\text{внт}}$ – швидкість витання визначена експериментально); дія частинок на повітряний потік не враховується; на частинку в процесі її взаємодії із нерівномірним потоком повітря ряд сил Архімеда, приєднаної маси, електростатичні та інші обмежень на які в наслідок їх мінімальних значень не враховуються); параметри вводу частинки в потік визначаються граничними умовами.

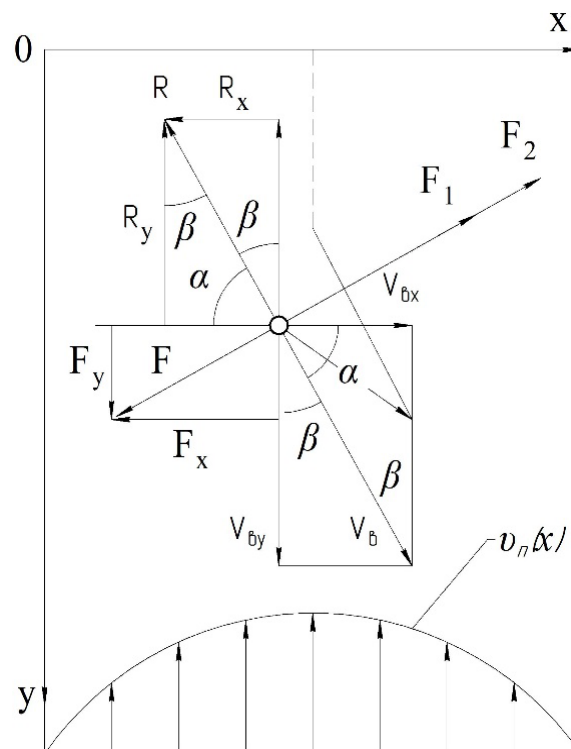


Рисунок 1 – Схема діючих сил і швидкостей на зернівку в процесі її руху в вертикальному пневмосепаруючому каналі

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 18-21]

Розподіл швидкості повітряного потоку за висотою каналу B прийнято в степеневому законі [8, 15]:

$$V_n(y) = V_{n(\max)} \left(\frac{X}{B} \right)^n,$$

де n – коефіцієнт що залежить від режиму обтікання частинки.

Рух частинки відбувається на площині в декартовій прямокутній системі координат XOY у вертикальному каналі.

Прийнято, що в повітряному потоці на кожну частинку діють такі сили: сила тяжіння, сила аеродинамічного опору R , а також бокові сили F_1 (типу Жуковського) та $F_2(\omega)$ – сила, що утворюється при обертанні частинки з частотою ω , (сила Магнуса) [7-8].

Тоді рівняння руху частинки в нерівномірному повітряному потоці можна записати у вертикальній формі:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{G} + \vec{R} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2(\omega),$$

де ω – кутова швидкість обертання частинки навколо її вісі.

На даний час немає точної теорії, дозволяючої визначити реальну силу аеродинамічного опору $\vec{R}$. Тому використана спрощена напівемпірична залежність [16]:

$$\vec{R} = m \cdot k_B (\vec{V}_n - V) |\vec{V}_n - V| = k_B m U^2,$$

в якій вектор сили опору спрямований в бік протилежний вектору відносної швидкості, а модуль пропорційний квадрату відносної швидкості:

$$\vec{U} = \vec{V}_n(y) - \vec{V},$$

де $\vec{V}$ – абсолютна швидкість частинки;

U – модуль швидкості частинки відносно системи координат x, y , що рухається разом з повітрям з переносною швидкістю – V_n .

Величина бокових сил $F_{1,2}$, для плоско-паралельного потоку, відповідно до теореми Жуковського М.Е. [7-8], є пропорційна відносній швидкості, набігаю чого на частинку потоку $\vec{U}$ і циркуляції:

$$\vec{F}_{1,2} = \rho \cdot \vec{U} \cdot \Gamma,$$

Відносна швидкість з урахуванням (1)

$$\vec{U}(x) = V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \vec{i} - \vec{V},$$

де $\vec{i}$ – одиничний вектор вісі oy .

Циркуляція швидкісного поля для бокової сили типу М. Жуковського відносно до [8], визначається з виразу:

$$\Gamma_1 = \pi r_n^2 \text{grad}_y U_y = \pi \cdot r_n^2 \frac{dU(X)}{dy},$$

Градiєнт відносної швидкості повітря C , визначається з виразу:

$$C = \frac{dU(X)}{dy} = U_{n \max} \frac{n}{B^n} x^{n-1},$$

а силу F_1 можна записати у вигляді:

$$\bar{F}_1 = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \bar{t} - \bar{V} \right] \pi r_{\text{ц}}^2 \cdot \rho,$$

де $r_{\text{ц}}$ – радіус циліндра еквівалентного кулі з радіусом r ; $r_{\text{ц}} = \frac{4}{3} r^3 = \frac{4}{3} \left(\frac{d}{2} \right)^3$.

При обертанні циліндра еквівалентного кулі, величина циркуляції визначається за формулою [8]:

$$\Gamma_2 = 2\pi r_{\text{ц}} U(X) = 2\pi r_{\text{ц}}^2 \omega = \frac{4}{3} \pi r^3 \omega,$$

де ω – кутова швидкість обертання частинки.

Бокова сила F_2 (за ефектом Магнуса) визначається виразом:

$$\bar{F}_2 = \frac{8}{3} \pi \rho \left(\frac{d}{2} \right)^3 \omega \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n \bar{t} - \bar{V} \right],$$

Швидкість обертання частинки в повітряному потоці під час переміщення змінюється, а їх значення можна наближено визначити рівнянням [1, 6-8, 14, 16, 19, 21].

$$\omega(t) = \omega_0 \exp \left[-\frac{18\mu}{\rho_r r^2} t \right],$$

де μ – динамічна в'язкість повітря;

ρ_r – густина частинки;

r – радіус;

ω_0 – початкове значення кутової швидкості.

Напрями вектора сили аеродинамічного опору вважається спрямованим у протилежний бік від відносної швидкості і тому проекції вектора $\bar{R}$ дорівнюють:

$$R_x = -R \sin \beta, \quad R_y = -R \cos \beta,$$

$$\text{де } \sin \beta = \frac{\dot{x}}{U}; \cos \beta = \frac{V_n(x) + \dot{y}}{U}; U = \sqrt{\dot{x}^2 + (V_n(x) + \dot{y})^2}$$

Оскільки напрям векторів бокових сил, F_1 , та F_2 , вважається спрямованими перпендикулярно [Зуєв] напрямку відносної швидкості у бік сторони частинки де швидкість обтікання більша, то проекція бокових сил дорівнює:

$$F_{(1,2)x} = \pm F_{(1,2)} \cos \beta, \quad F_{(1,2)y} = \pm F_{(1,2)} \sin \beta,$$

Вектор $\bar{U}$ є дотичним до траєкторії руху частинки в системі координат XOY .

При розрахунку траєкторії частинки треба визначити залежності $y(t)$ і $y(t)$. Для знаходження функцій $y(t)$ і $y(t)$ спроектуємо рівняння руху частинки на вісі системи координат XOY .

$$m\ddot{x} = -R \sin \beta \pm F_1^x \cos \beta \pm F_2^x \cos \beta,$$

$$m\ddot{y} = mg - R \cos \beta \pm F_1^y \sin \beta \pm F_2^y \sin \beta.$$

Подвійні знаки перед силами F_1 означають зміну напрямку вектора дії сили при пересіченні часткою вісі симетрії в точці $x=0$ де ($V_n = V_{n \max}$). Задаються граничними умовами. Напрямок вектора сили F_2 залежить від напрямку обертання частинки навколо її вісі (випадку колеподібної форми частинки).

Проекції сил $F_{1,2}^{x,y}$ (по модулю) дорівнюють:

$$F_1^y = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - V_y \right] \frac{\pi}{2} r^3 \rho,$$

$$F_1^x = \frac{V_{\max} n x^{n-1}}{B^n} V_x \frac{\pi}{2} r^3 \rho,$$

$$F_2^x = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 V_y \omega(t), \quad V_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y},$$

$$F_2^y = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \left[V_{n \max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - V_y \right] \omega(t), \quad V_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x},$$

Функція $\omega(t)$ визначається розв'язком диференціального рівняння:

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} = \bar{M},$$

де M – момент, що діє на частинку величина якого визначається силою аеродинамічного опору і плечем щодо центра мас частинки;

I – момент інерції.

Не вдаючись до подробиць методики визначення величини плеча сили відносно центра мас частинки (наведеної в роботі [8] для прийнятого розподілу швидкості повітря в каналі $V(y)$, залежності (1) для значення $n = \frac{1}{7}$ в роботі [8] отримано лінійний закон зміни величини плеча $a(x)$:

$$a(\lambda)a = 0,125 \frac{r}{B-r} (B-x),$$

де x – координата центра мас частинки.

Величина моменту $\bar{M} = \bar{R}a(x)$ рівняння (21) при цьому набуває вигляду:

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0,152 \cdot k_B \cdot m \cdot \left(V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^{\frac{1}{7}} - V_y \right)^2 \cdot \frac{B-x}{B-r},$$

З огляду на вищезгадане і враховуючи, що $m = \frac{4}{3} r^3 \rho_r$, ρ_r – густина речовини частинки диференціальні рівняння руху круглої частинки в проекціях на вісі координат XOY можна представити у такому вигляді:

$$\ddot{x} = -k_n \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2} + \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y}^2 + V_n(x))^2}} \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \cdot \dot{x} \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} x^{n-1}}{B^n} \dot{x} \right],$$

$$\ddot{y} = g - k_n (\dot{y} + V_n(x)) \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} + V_n(x))^2} + \frac{\dot{y} + V(x)}{\sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y}^2 + V_n(x))^2}} \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \cdot V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - \dot{y} \right] \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} x^{n-1}}{B^n} \left[V_{\max} \left(\frac{x}{B} \right)^n - \dot{y} \right],$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь визначає рух круглої частинки радіусом r з густиною ρ_r в системі координат XOY у вертикальному повітряному потоці, обмеженому координатами $0,5r \leq x \leq B$. При входженні частинки в другу

половину потоку сила F_1 змінює напрямлення. Сила опору R в будь якій точці потоку буде спрямована протилежно вектору відносної швидкості. При координаті центра мас частинка $x > B$ напрямком складових F_{1x} і F_{1y} бокових сил змінюється тому в наведених вище рівняннях перед виразами цих сил знак змінюється на протилежний. Проекція сили F_{2x} змінює знак при зміні напрямку кутової швидкості.

Направлення моменту M при значенні $x > B$ змінюється на протилежне.

Крім всього відміченого треба враховувати, що залежність $V_n(x)$ зміни швидкості повітря в поперечному перетині каналу справедлива тільки до значення $x=B$. Тому при числовому розв'язку координат на вісі x визначають з негативного значення $(-B \ 0 \ +B)$, де B – величина половини каналу на яку його перетин розділяє вісь симетрії і місце завантаження з негативного боку каналу.

Початкові і граничні умови для розв'язку системи рівнянь можуть бути записані у вигляді: при $t = 0$, $y = 0$, $x = -B$, $\omega = \pm \omega_0$, $\dot{x}(0) = V_0 \cos \lambda_0$;

$$\dot{y}(0) = V_0 \sin \lambda_0; \quad \bar{x}(0) = -(x + r) .$$

граничні умови: $x < 0$; $F_1 > 0$; $F_2 > 0$;

$$x > 0; \quad F_1 < 0; \quad F_2 < 0;$$

$$-(x - r) \leq x \leq (x - r) .$$

Дійсна швидкість повітряного потоку при наявності в каналі зернового матеріалу визначається за очевидною формулою:

$$V_n |x| = \frac{V_n \cdot f}{\varepsilon}; \quad V_{n \max} = \frac{V_{\max}}{\varepsilon}$$

$$\text{де } \varepsilon = \frac{1}{1 + \mu};$$

$$\mu - \text{масова концентрація матеріалу. } \mu = \frac{G_3}{G_{\Pi}};$$

G_{Π}, G_3 – витрати повітря і зерна кг/с.

Розв'язок системи рівнянь з визначеними початковими і граничними умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторії руху частинок з різними значеннями k_n і наведено на (рис. 2).

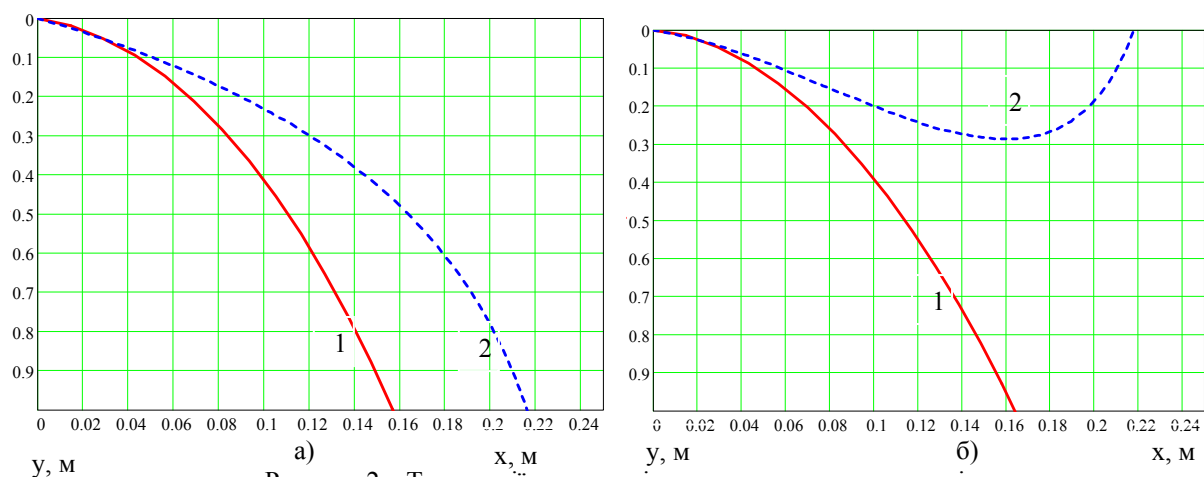


Рисунок 2 – Траєкторії руху зернівок у вертикальному каналі:

а) при рівномірній швидкості потоку; б) при розподіленій швидкості потоку повітря;

1 – $k_n=0,081$; 2 – $k_n=0,153$.

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо плоский повітряний канал розміщений горизонтально (рис. 3). Подача матеріалу в канал реалізується в напрямку рух потоку під кутом α_0 і швидкістю V_0 . Швидкість потоку повітря в поперечному перетині каналу розподілена за ступеневим законом $V_n(y) = V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n$; (де $B=0,5H$ – половина висоти каналу) по висоті каналу H .

Рух частинки відбувається на площині в прямокутних координатах x, y .

Проекція діючих сил: G, R, F_1, F_2 на вісі координат визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} R_x &= R \cos \lambda; \quad \cos \lambda = \frac{\dot{x}}{U}; \quad \sin \lambda = \frac{\dot{y}}{U}; \\ R_y &= -R \sin \lambda; \quad \sin U = \sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}; \\ F_{1,2}^x &= F_{1,2} \sin \lambda; \quad F_{1,2}^y = F_{1,2} \cos \lambda \end{aligned}$$

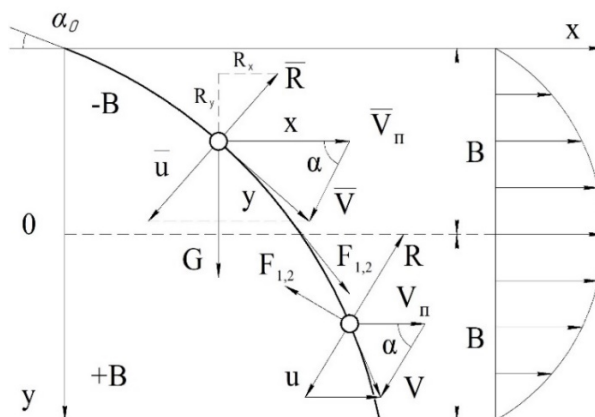


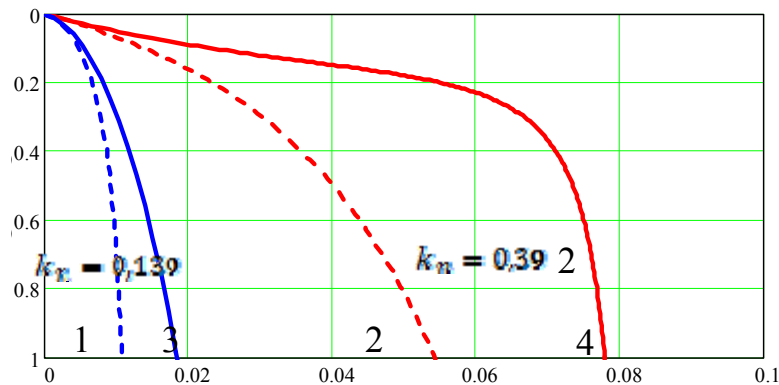
Рисунок 3 – Схема швидкостей і сил, що діють на зернівку в горизонтальному повітряному каналі
Джерело: розроблено авторами

З урахуванням отриманих співвідношень проектуючи рівняння на осі X, Y отримаємо систему диференціальних рівнянь, які описують динаміку переміщення частинки в супутньому повітряному потоці горизонтального каналу:

$$\begin{cases} \ddot{x} = k_n(V_n(y) - \dot{x})\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} + \frac{\dot{y}}{\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}} \cdot \\ \quad \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \dot{x} \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} y^{n-1}}{B^n} \dot{x} \right], \\ \ddot{y} = g - k_n \dot{y} \sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \pm \frac{(V_n(y) - \dot{x})}{\sqrt{(V_n(y) - \dot{x})^2 + \dot{y}^2}} \cdot \\ \quad \left[2 \frac{\rho}{\rho_r} r^3 \omega(t) \left(V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n - \dot{y} \right) \pm \frac{\rho}{\rho_r} r^3 n \frac{V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n}{B^n} - \dot{y} \right], \\ I \frac{d\omega}{dt} = 0,0625 \cdot k_n \cdot m \cdot \left(V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^{\frac{1}{7}} - V_x \right)^2 \cdot \frac{B - x}{B - r}. \end{cases}$$

Початкові та граничні умови $t = 0; y = -B; x = 0; \dot{x} = V_0 \cos \lambda_0; \dot{y} = V_0 \sin \lambda_0; y < 0; F_1, F_2 > 0; y > 0; F_{1,2} < 0; -(y+r) \leq y \leq (y+r)$.

Розв'язок рівняння отримано чисельно в комп'ютерному середовищі MathCad – 10 у вигляді траєкторій руху частинки при рівномірному і нерівномірному потоці, які представлено на (рис. 4).



1, 2 – рівномірний потік повітря; 3, 4 – нерівномірний потік повітря
Рисунок 4 – Траєкторії руху частинок в горизонтальному каналі за рівномірного та нерівномірного потоку повітря

Джерело: розроблено авторами

При моделюванні руху частинок в нахиленому плоскому повітряному каналі, верхні та нижні стінки якого нахилені до горизонту під кутом γ , а відстань між ними дорівнює $H = 2B$, схема якого наведена на (рис. 5).

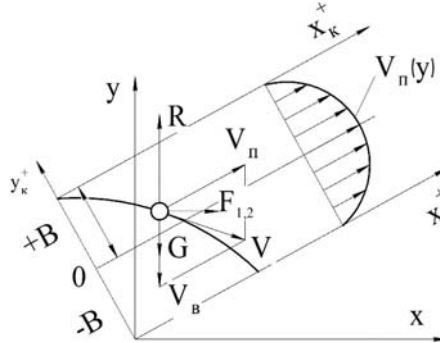


Рисунок 5 – Схема швидкостей і сил, що діють на зернівку в нахиленому повітряному каналі

Джерело: розроблено авторами

За умов швидкості висхідного повітряного потоку розподіленого нерівномірно за висотою каналу відносно осі симетрії за ступеневим законом $V_n(y) = V_{\max} \left(\frac{y}{B} \right)^n$, можна використовувати систему диференціальних рівнянь, яка описує рух частинки в повітряному каналі (квазігоризонтальному) відповідно до [17]. При цьому до першого рівняння системи додається складова $-g \sin \gamma$, а в другому рівнянні величина прискорення вільного падіння множиться на $\cos \gamma$, (тобто $-g \cos \gamma$).

Встановлено, що для кожного поточного моменту часу t з координатами переміщення частинки $y_i(t_i)$ та $x_i(t_i)$ у відповідних напрямках можливо побудувати траєкторії переміщення в системі координат XOY .

Висновки. 1. Отримані математичні моделі описують основні особливості рух частинок, які різняться коефіцієнтом вітрильності, розміром і густиною у вертикальних, горизонтальних і нахилених пневмоканалах зерно сепараторів.

2. Математичні моделі переміщення компонентів зернового матеріалу дозволяють розраховувати траєкторії руху і кількісно оцінити вплив нерівномірності

швидкості потоку і її структури на розходження траєкторій і, відповідно ефективність сепарації за аеродинамічними характеристиками.

3. Визначивши вплив структури повітряного потоку на відхилення траєкторії руху частинок можна оцінити процес сепарації можливість керування процесом поділу зміною епюри швидкості повітря.

Список літератури

1. Василенко П.М. Об уравнениях транспортировки частиц в сопротивляющихся средах. *Доклады ВАСХНИЛ*. 1970. №4, С. 44 – 46.
2. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. Киев «Сільгоспосвіта», 1996. 251 с.
3. Заика П.М. Теория сельскохозяйственных машин Т.4. Харків, 2002.
4. Гортинский В.В. Процеси сепарування на зерноперерабатывающих предприятиях. / В.В. Гортинский, А.М. Демский, М.А. Борискин. М. Колос 1980. 296 с.
5. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М. Машгиз, 1962. 452 с.
6. Нелюбов А.И., Ветров Е.Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1967. 190 с.
7. Прандль Л. Гидроаэромеханика. М. Иностран. лит., 1951. 575 с.
8. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М. Колос, 1976. 344 с.
9. Матвеев А.С. Исследование процесса сепарирования зерновых смесей вертикально-восходящим воздушным потоком: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. М. ВИМ. 1973. 30 с.
10. Злочевский В.Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук. Новосибирск. Сиб. ИМЭСХ 1986. 35 с.
11. Абдуев М.М., Манчинский Ю.О. Теоретичне визначення доцільної області параметрів повітряного ворохоочисника. *Наукові праці Національного аграрного ун-ту*. 2000. Т 7. С. 127 – 132.
12. Колодій О.С. Обґрунтування конструктивно – технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, ТДТАУ, 2015. 26 с.
13. Степаненко С.П., Котов Б.І. Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодерж. зб.* 2018. Вип. №7 (106). С.82-89.
14. Онищенко Б.В. Теоретичні дослідження процесу осідання краплі. *Сільськогосподарські машини*. 2009. Вип. 18. С. 330 – 340.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, М.-Л.: Гос. изд. Техничко-теор лит., 1950. 676 с.
16. Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках, К. «Наукова думка» 1972. 173 с.
17. Бакум М.В., Ольшанський В.П., Кречот М.М. Теоретичний аналіз руху частинок в плоскому нахиленому пневмоканалі сепараторів. *Вісник ХНТУСГ*. 2009. Вип. 88. С.19 – 26.
18. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. S.– 54–56.
19. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.
20. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera / S. Stepanenko, Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. // In: *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, vol. 12 (61), No. 1 – 2019. pp. 117-128.
21. Stepanenko S.P. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment / Stepanenko S.P, Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Solomka O.V., Popyk P.S., Shvidia V.O. // *INMATEH - Agricultural Engineering* . Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p141-146. 6p.
22. Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly / Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. - VOL 6, № 1 (96). - P.62-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>
23. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality / O.Vasylkovskiy, K. Vasylkovska, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk // *INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA*. Vol. 57, No.1. 2019, 63-70.

24. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding / O.V. Nesterenko, S.M. Leshchenko, O.M. Vasylovskiy, D.I. Petrenko // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 53, No.3. 2017, 65-70.

Referencis

1. Vasilenko, P.M. (1970). On the equations of particle transport in resisting media. *Doklady VASKhNIL*, №4, 44 - 46. [in Russian].
2. Vasilenko, P.M. (1996). Introduction to Agricultural Mechanics. Kiev "Silgospovita" [in Russian].
3. Stutterer, P.M. (2002). Theory of agricultural machines V.4. Kharkiv [in Russian].
4. Gortinsky, V.V., Demsky, A.M. & Boriskin, M.A. (1980). Separation processes at grain processing plants. Moscow. Kolos [in Russian].
5. Malis, A.Ya. & Demidov, A.R. (1962). Machines for cleaning grain with air flow. Moscow: Mashgiz [in Russian].
6. Nelyubov, A.I. & Winds, E.F. (1967). Pneumatic separating systems of agricultural machines. Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].
7. Prandtl, L. (1951). Hydroaeromechanics. Moscow: Foreign. lit. [in Russian].
8. Zuev, F.G. (1976). Pneumatic transportation at grain processing plants. Moscow: Kolos [in Russian].
9. Matveev, A.S. (1973). Investigation of the process of separation of grain mixtures by vertical ascending air flow. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow: VIM. [in Russian].
10. Zlochevsky, V.L. (1986). Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials. Doctor's thesis.. Novosibirsk. Sib. IMESH [in Russian].
11. Abduev, M.M. & Manchinsky, Yu.O. (2000). Theoretical value of the pre-social area of the parameters of the daily attendant. *Science of the National Agrarian University*, Vol. 7, 127 - 132. [in Ukrainian].
12. Kolodiy, O.S. (2015). Obruntuvannya of constructive - technological parameters of pneumogravitational separator for sleepers. *Extended abstract of candidate's thesis*. Melitopol, TDAU [in Ukrainian].
13. Stepanenko S.P. & Kotov B.I. (2018). Pre-admission of regularities to the decline of components in grain material before an hour of pneumogravitational fractionation near the vertical channel. *Mechanization and electrification of the Silskoy state gift: Zagalnoho zbirnik*, Vol. 7 (106, 82-89. [in Ukrainian].
14. Onishchenko, B.V. (2009). Theoretical dosage to the process of growing the space. *Silskogospodarski machines Lutsk*, Vol. 18, 330 - 340 [in Ukrainian].
15. Loytsyansky, L.G. (1950). *Mechanics of liquid and gas*, M.-L. : State. ed. Tekhniko-teor lit. [in Russian].
16. Babukha, G.L. & Shreiber, A.A. (1972). *Interaction of particles of polydisperse material in two-phase flows*. Kyiv: "Naukova Dumka" [in Russian].
17. Bakum, M.V., Olshansky, V.P. & Krekot, M.M.. (2009). Theoretical analysis of a debris of particles in a flat, heaped pneumatic channel of separators. *Bulletin of KhNTUSG*, Vol. 88, 19 - 26. [in Ukrainian].
18. Stepanenko, S. P. (2017). Research pneumatic gravity separation grain materials. Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0". Bulgarian, Vol. 63. Issue 2. Pp. 54–56. [in English].
19. Kotov, B. I., Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S.P., Shvidya, V.O. & Lisetsky, V.O. (2017). Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling). Nizhin: Vidavets PP Lisenko M.M. [in Ukrainian].
20. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera / S. Stepanenko, Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. // In: Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, vol. 12 (61), No. 1 – 2019. pp. 117-128. [in English].
21. Stepanenko S.P. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment / Stepanenko S.P, Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Solomka O.V., Popyk P.S., Shvidia V.O. // INMATEH - Agricultural Engineering . Jan-Mar 2019, Vol. 57 Issue 1, p141-146. 6p. [in English].
22. Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly /Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. - VOL 6, № 1 (96). - P.62-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739> [in English].
23. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality [Text] / O. Vasylovskiy, K. Vasylovskya, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 57, No.1. 2019, 63-70. [in English].
24. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding [Text] / O.V. Nesterenko, S.M. Leshchenko, O.M. Vasylovskiy, D.I. Petrenko // INMATEH - Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 53, No.3. 2017, 65-70. [in English].

Serhii Stepanenko PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Agricultural Mechanization and Electrification", Glevakha, Ukraine

Boris Kotov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Podilsky State Agrarian Technical University, Kamyanets-Podilsky, Ukraine

Main the Oretical Provisions of Grain Material Separation in Air Channels with Unequal Air Flow Speed

The article considers the increase of efficiency of grain materials separation in pneumatic vertical channels by determining the rational shape and parameters of material supply, as well as the geometric shape of the pneumatic channel and options for separation into fractions.

Regularities of change of trajectory and speed of movement of material in pneumatic vertical channels of round section with the lower unloading of material are received. The regularities of particle motion in the form of a material point were determined taking into account air resistance forces, friction forces, Magnus and Zhukovsky forces, material moisture and density based on a theoretical study of grain fractionation in pneumatic vertical channels.

Using the proposed dependences for the design of air separators, it is possible to determine the initial rate of introduction and the direction of entry of grains into the air stream, which are the initial conditions for determining the trajectory of material in air channels with lower material discharge.

air flow, grain material, Magnus and Zhukovsky forces, variable air velocity, trajectory, fractionation process, air separator

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 629.113.5.62-592

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.133-139>

В.О. Дубовик, доц., канд. техн. наук, **Ю.А. Невдаха**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Чернов**, магістрант

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: zenesperanto@gmail.com*

Підвищення довговічності роликів-електродів при електроконтактному наплавленні деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки

Витрати на ремонт деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки постійно зростають, тому актуальним є питання пошуку недорогих технологій їх відновлення. До таких технологій відноситься електроконтактне наплавлення. Однією з причин, що стримує широке застосування цього способу, є низька зносостійкість ролика-електрода.

У дослідженні розглядали умови роботи роликів-електродів, міцність зварного з'єднання при застосуванні інструменту із різним ступенем спрацювання. Встановлено, що спрацювання ролика-електрода при електроконтактному наплавленні негативно позначається на міцності зварного з'єднання металопокриття з основою через зменшення деформації присадного дроту. Повністю компенсувати негативний вплив спрацювання електроду на якість зварного з'єднання коригуванням технологічних режимів наплавлення не вдається.

В результаті розробили рекомендації по вибору матеріалу і розмірів роликів-електродів, що застосовуються при електроконтактному наплавленні деталей мобільної сільськогосподарської та транспортної техніки.

електроконтактне наплавлення, ролик-електрод, присадний дріт, зносостійкість, металопокриття

© В.О. Дубовик, Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов, В.М. Чернов, 2020

В.А. Дубовик, доц., канд. техн. наук, **Ю.А. Невдаха**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **В.Н. Чернов**, магістрант

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Повышение долговечности роликов-электродов при электроконтактной наплавке деталей мобильной сельскохозяйственной и транспортной техники

Расходы на ремонт деталей мобильной сельскохозяйственной и автотранспортной техники постоянно растут, поэтому актуален вопрос поиска недорогих технологий их восстановления. К таким технологиям относится электроконтактная наплавка. Одной из причин, которая сдерживает широкое применение этого способа является низкая износостойкость ролика-электрода.

В исследовании рассматривали условия работы роликов-электродов, прочность сварного соединения при применении инструмента с разной степенью износа. Установлено, что износ ролика-электрода при электроконтактной наплавке негативно сказывается на прочности сварного соединения металлопокрытие с основой из-за уменьшения деформации присадочной проволоки. Полностью компенсировать негативное влияние изнашивания электрода на качество сварного соединения корректировкой технологических режимов наплавки не удастся.

В результате были разработаны рекомендации по выбору материала и размеров роликов-электродов, применяемых при электроконтактной наплавке деталей мобильной сельскохозяйственной и транспортной техники.

электроконтактная наплавка, ролик-электрод, присадочная проволока, износостойкость, металлопокрытие.

Постановка проблеми. Спрацювання деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки призведе до зниження їх тягової потужності, робочої швидкості, підвищення витрат паливо-мастильних матеріалів, а також підвищення затрат на технічне обслуговування у 3 – 4 рази [1]. Витрати на ремонт постійно зростають, причому до 50 – 70% витрат припадає на запасні частини [1, 2]. В таких умовах все актуальнішим постає питання пошуку недорогих технологій відновлення зношених деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. Дослідженнями [3 - 5] показано, що відновлювати деталі економічно вигідно так-як є можливість повторного використання близько 65...75% спрацьованих деталей.

Тому особливе значення мають технології, які дозволяють відновлювати деталі без суттєвого збільшення матеріальних витрат – це технології електроконтактного наплавлення (ЕКН) [3 – 7].

Важливою частиною установки для ЕКН є ролик-електрод. Однією з причин, що стримує широке застосування способу ЕКН, є низька стійкість ролика-электрода. В даний час проведено мало досліджень по вивченню процесу зношування роликів-електродів і підвищенню їх зносостійкості.

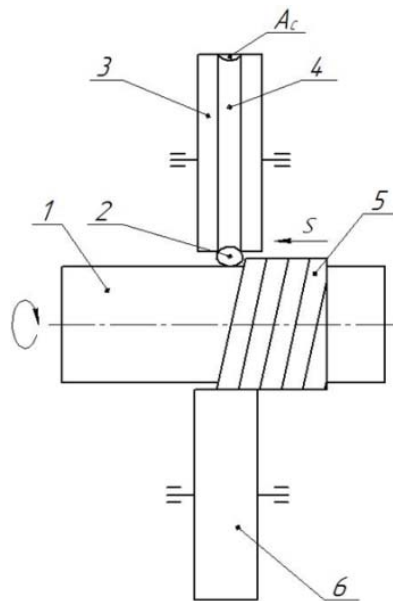
Аналіз основних досліджень і публікацій. Серед відомих вчених дослідженнями технологічних процесів відновлення спрацьованих деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки займалися Б.М. Аскиназі, Д.Г. Вадивасов, Е.Л. Воловик, М.І. Доценко, В.А. Дубровський, В.А. Емельянов, В.І. Казарцев, Ю.В. Клименко, І.С. Левицький, В.П. Лялякін, Ю.Н. Петров, М.М. Севернєв, А.І. Селіванов, І.Е. Ульман, М.М. Фархшатов, М.І. Черновол, В.І. Черноіванов, В.А. Шадрічев. Завдяки їх дослідженням в теперішній час широке розповсюдження отримали технології відновлення валів ЕКН сталених стрічок і припіканням металевих порошків.

При цьому найбільш дешевим і доступним присадним матеріалом у порівнянні із сталеними стрічками і металевими порошками є металеві дроти. Широке застосування металевих дрітків при ЕКН стримує дефіцит необхідного технологічного обладнання. Крім того, не вирішені повністю технологічні питання ЕКН. Потребують дослідження технологічні параметри, які забезпечують високу міцність і якість відновлюваних

покриттів. Також недоліком ЕКН є підвищене спрацювання інструменту – роликів-електродів [4, 8].

Постановка завдання. На основі проведених досліджень розробити рекомендації, які забезпечать підвищення довговічності роликів-електродів при ЕКН.

Виклад основного матеріалу. Багатократний вплив температури і тиску наплавлювальних дрітів на ролик-електрод призводить до його поступового спрацювання. Спрацювання являє собою кільцеву канавку з дуже малими поперечними розмірами, без чіткого контуру (рис. 1) [8].



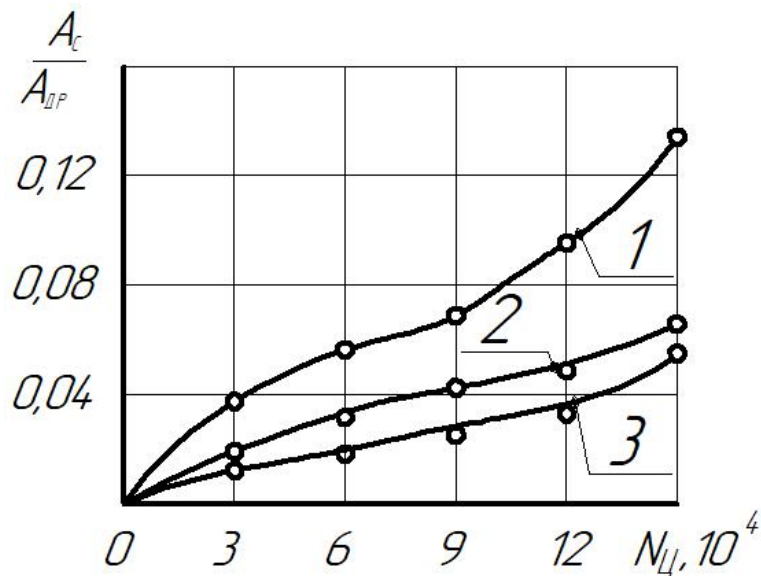
1 – вал, що наплавляється; 2 – присадний дріт; 3 – ролик-електрод; 4 – кільцева канавка спрацювання; 5 – металопокриття; 6 – другий ролик-електрод

Рисунок 1 – Формування електроконтактним наплавленням і формування канавки спрацювання

Джерело: розроблено авторами з використанням [3, 4, 6, 8]

У довідниковій літературі дуже мало відомостей про зносостійкість роликів-електродів, приводяться лише фізико-механічні характеристики різних матеріалів. Тому були проведені експериментальні дослідження зносостійкості роликів-електродів, які виготовлені з різних матеріалів.

Наплавляли зразки діаметром 50 мм із сталі 45 пружинним дротом діаметром 1,8 мм на наступних режимах: струм наплавлення 7,0 кА; колова швидкість обертання зразка 20 мм/с; зусилля на ролик 1,2 кН. Тривалість імпульсів струму і пауз між ними складали відповідно 0,04 с і 0,08 с. і регулювали тиристорним перебивачем. Випробування на спрацювання проводили з використанням роликів-електродів діаметром 300 мм і гарячекатаної міді, з бронзи Бр.НБТ, Бр.Х (рис. 2).



1 – електрод з гарячекатаної міді; 2 – електрод з бронзи Бр.Х; 3 – електрод з бронзи Бр.НБТ;
 A_c – площа перерізу кільцевої канавки спрацювання ролика; $A_{др}$ – площа перерізу присадного дроту

Рисунок 2 – Спрацювання робочих поверхонь роликів електродів в залежності від числа циклів наплавлення

Джерело: розроблено авторами

Спрацювання інструменту при ЕКН негативно позначається на міцності зварного з'єднання металопокриття з основою із-за зменшення деформації присадного дроту. На рис. 3 наведені, визначені згідно досліджень [3, 4, 7] залежності якості зварного з'єднання від величини спрацювання робочої поверхні інструменту.

Графіки побудовано для оптимального режиму наплавлення, при якому відносна осьова деформація присадного дроту, що відповідає наплавленню неспрацьованим інструментом, склала $\varepsilon=0,472$, і для режиму з початковим значенням $\varepsilon=0,300$.

З наведених результатів видно, що вже при невеликих спрацюваннях, рівних $0,04...0,05A_{др}$, міцність зварного з'єднання знижується на 30...40% у порівнянні з аналогічним показником для неспрацьованого ролика-електрода. Ці розрахункові залежності добре підтверджуються результатами експериментів.

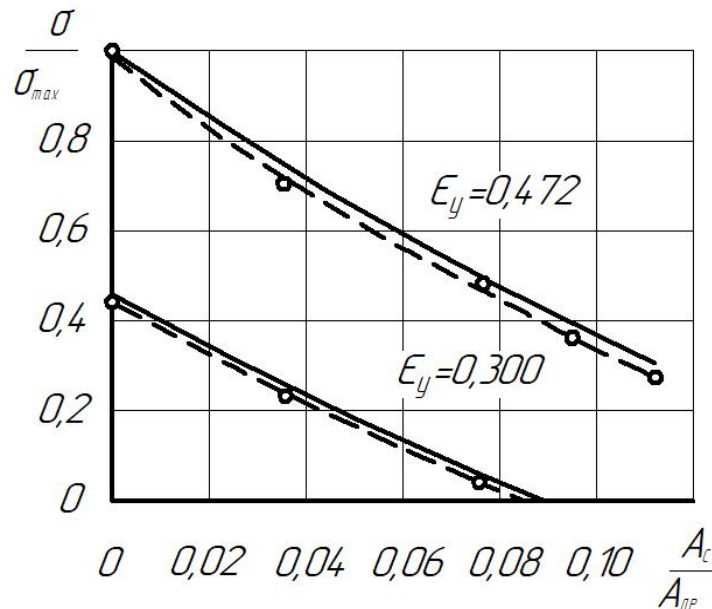
Результати випробувань на спрацювання показують, що істотне зниження якості зварного з'єднання відбувається при застосуванні електродів з гарячекатаної міді вже через 1,5...2 години роботи.

Повністю компенсувати негативний вплив спрацювання електроду на якість зварного з'єднання коригуванням технологічних режимів наплавлення не вдається. Це вказує про необхідність 2 – 3 кратної заміни таких інструментів, після проточки їх робочих поверхонь на токарному верстаті. При застосуванні більш зносостійких, одночасно і більш дорогих електродів з бронзи Бр.НБТ ролик-електрод досить заправити один раз за зміну.

В даний час немає обґрунтованих рекомендацій по вибору розмірів роликів-електродів, що застосовуються при ЕКН. Тому вибирати розмір інструменту слід з умови забезпечення сприятливих умов пластичної деформації присадного матеріалу.

При проходженні імпульсу зварювального струму між валом, що наплавляється і роликом-електродом присадний дріт періодично розігрівається до пластичного стану і осаджується з боку вала на величину t_1 і з боку ролика-електроду на величину t_2 .

При однакових умовах наплавлення на співвідношення значень осадження присадного дроту з боку вала t_1 і з боку ролика t_2 істотно впливає радіус ролика. Для формування міцного зварного з'єднання краще, якщо основна деформація присадного дроту відбудеться з боку вала, а не з боку ролика, тобто якість наплавлення тим вища, чим менше відношення t_2/t_1 .



- експериментальна залежність; - - - - теоретична залежність

Рисунок 3 – Вплив спрацювання робочої поверхні електроду на міцність зварного з'єднання при різних значеннях відносної осьової деформації дроту

Джерело: розроблено авторами з використанням [3, 4, 7]

При розрахунках складових осадження присадного дроту [7, 8], приймали наступні значення параметрів наплавлення: $R_2=25$ мм, $d=1,8$ мм, $\delta=0,60$ мм.

Підраховували значення складових осадження t_1 і t_2 для різних значень радіуса ролика R_2 . За результатами розрахунків побудовано графічну залежність відношення t_2/t_1 від розміру R_2 ролика (рис. 4).

В результаті видно, що зі збільшенням розміру електроду, відношення деформацій t_2/t_1 зменшується. Тому, збільшення діаметру ролика до 150...175 мм позитивно впливає на якість наплавлення. Подальше збільшення R_2 на відношення t_2/t_1 впливає несуттєво.

Рекомендована, з конструктивних міркувань, товщина ролика-електрода 10...15 мм.

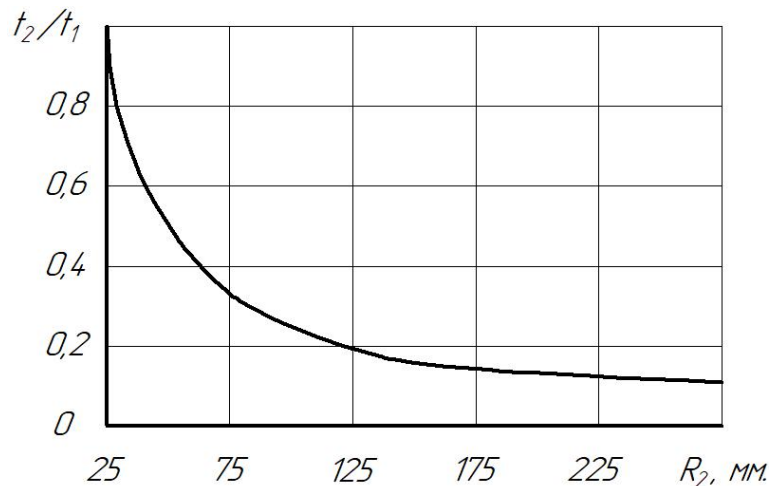


Рисунок 4 – Співвідношення складових осадження присадного дроту при різних співвідношеннях осадження присадного дроту з боку валу t_1 і з боку ролика t_2 .

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Спрацювання ролика-електрода при ЕКН негативно позначається на міцності зварного з'єднання металопокриття з основою через зменшення деформації присадного дроту. Виявлено, що найбільшу зносостійкість мають ролики-електроди, робоча частина яких виготовлена з нікель-берилієвих бронз Бр.НБТ. Також високу зносостійкість мають інструменти з хромистої бронзи Бр.Х.

Встановлено, що для ЕКН валів мобільної сільськогосподарської та транспортної техніки необхідно застосовувати наплавлювальні ролики діаметром 300 мм.

Список літератури

1. Лялякин В.П. Состояние и перспективы ремонта машин в АПК. *Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем*: сб. научных трудов междунар. научн.-техн. конф., посвященной 50-летию образования Института механики и энергетики «Ковылкино»: Ковылкинская районная типография, 2007. С. 44 – 50.
2. Липкович Э.И. Производство тяжелых сельскохозяйственных тракторов: состояние и перспективы. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. №11. С. 78 – 83.
3. Зорин А.И. Организация восстановления изношенных деталей. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2006. №5. С. 30 – 32.
4. Фархшатов М.Н. Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственных техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионноустойчивых и износостойких материалов: дисс.... д-ра. техн. наук: 05.20.03. М., 2007. 527с.
5. Черновол М.И. Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: дисс. д-ра техн. наук: 05.20.03/ Кировоградский ин-т сельскохозяйственного машиностроения. Кировоград, 1992. 502.
6. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: ГОСНИТИ, 2003. 488 с.
7. Дубовик В.О., Труш М.М., Дяченко О.М. Дослідження технології відновлення деталей типу «вал» електроконтактним наплавленням. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. наук. матеріалів Міжнар. наук.-практ. інтернетконф., 14-15 листопада 2018 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 186 – 190.
8. Нафиков М.З., Загиров И.И. Выбор инструмента для электроконтактной наплавки // Материалы XLVI международной научно-технической конференции «Достижения науки - агропромышленному производству», ч.2. Челябинск: ЧГАУ, 2007. С.129 – 133.

Referencis

1. Lyalyakin, V.P. (2007). Sostoyaniye i perspektivy remonta mashin v APK [State and prospects of car repair in the AIC]. Improving the efficiency of the functioning of mechanical and energy systems: *Mezhdunarodnaia nauchno-tehnicheskaya konferentsia – International Scientific and Practical Conference* (pp. 44 – 50). Kovylkino: Kovylkinskaya rayonnaya tipografiya [in Russian].
2. Lipkovich, E.I. (2006). Proizvodstvo tyazhelykh selskokhozyaystvennykh traktorov: sostoyaniye i perspektivy [Production of heavy agricultural tractors: state and prospects]. *Traktory i selskokhozyaystvennye mashiny – Tractors and agricultural machines*, №11, 78 – 83 [in Russian].
3. Zorin, A.I. (2006). Organizatsiya vosstanovleniya iznoshennykh detaley [Organization of the restoration of worn-out parts]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture*, №5, 30 – 32. [in Russian].
4. Farkhshatov, M.N. (2007). Resursosberegayushchiye tekhnologii vosstanovleniya detaley selskokhozyaystvennykh tekhniki i oborudovaniya elektrokontaktnoy privarkoy korrozionnostoykikh i iznosostoykikh materialov [Resource-saving technologies for the restoration of parts of agricultural machinery and equipment by electro-contact welding of corrosion-resistant and wear-resistant materials]. *Doctor's thesis*. Moscow, [in Russian].
5. Chernovol, M.I. (1992). Tekhnologicheskiye osnovy vosstanovleniya detaley selskokhozyaystvennoy tekhniki kompozitsionnymi pokrytiyami [Technological basis for the restoration of agricultural machinery parts with composite coatings]. *Doctor's thesis*. Kirovograd [in Russian].
6. Chernoiyanov, V.I. & Lyalyakin, V.P. (2003). *Organization and technology of restoration of machine parts*. (2-nd. ed.). Moscow: GOSNIT [in Russian].
7. Dubovyk, V.O., Trush, M.M. & Diachenko, O.M. (2018). Doslidzhennia tekhnolohii vidnovlennia detalei typu «val» elektrokontaktym naplavlenniam [Research of technology of restoration of details like "shaft" by electrocontact surfacing]. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: Mizhnarodna naukovo-praktychna internetkonferentsiia (14-15 lystopada 2018 roku) – *International Scientific and Practical Internet Conference* (pp.186 – 190). Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
8. Nafikov, M.Z. & Zagirov, I.I. (2007). Vybory instrumenta dlya elektrokontaktnoy naplavki [Choice of tools for electrocontact surfacing]. Scientific achievements - for agro-industrial production: XLVI Mezhdunarodnaia nauchno-tehnicheskaya konferentsia – XLVI *International Scientific and Technical Conference* (pp. 129 – 133). (part.2). Chelyabinsk: ChGAU [in Russian].

Viktor Dubovyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yurii Nevdakha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vladyaslav Chernov**, master
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Durability of Roller-electrodes in Electrocontact Surfacing of Parts of Mobile Agricultural and Transport Equipment

During the operation of mobile agricultural and motor vehicles, their connections and parts are activated. This leads to a decrease in traction power, operating speed, quality and productivity when performing technological operations. Repair costs are constantly rising, so the question of finding inexpensive technologies for the restoration of worn parts is relevant. Such technologies include electro-contact surfacing.

One of the reasons that constrains the widespread use of the method of electrocontact surfacing is the low stability of the electrode roller. Currently, little research has been conducted to study the wear of the electrode rollers and increase their wear resistance.

The research on search of ways of increase of durability of rollers-electrodes at electrocontact surfacing is carried out. The operating conditions of the electrode rollers and their operation, the strength of the welded joint when using a tool with different degrees of operation were considered. The operation of the roller-electrode during electro-contact surfacing has a negative effect on the strength of the welded joint of the metal coating with the base due to the reduction of deformation of the filler wire. The results of tests for operation show that a significant reduction in the quality of the welded joint occurs when using electrodes made of hot-rolled copper after 1.5...2 hours of operation. It is not possible to fully compensate for the negative impact of the electrode operation on the quality of the welded joint by adjusting the technological modes of surfacing. This indicates the need for 2 - 3 times the replacement of such tools, after grooving their working surfaces on a lathe.

Developed recommendations for the choice of sizes of rollers-electrodes used in electro-contact surfacing of parts of mobile agricultural and transport equipment.

electrocontact surfacing, roller electrode, filler wire, wear resistance, metal coating

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.7; 631.313

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.140-151>

В.М. Кропивний, проф., канд. техн. наук, **М.О. Свірень**, проф., д-р техн. наук, **О.В. Кузик**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Амосов**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: vlkropivny@gmail.com, e-mail: kaf_sgm_kntu@ukr.net, e-mail: kuzikov1985@gmail.com, e-mail: v_vas_a@ukr.net

М.А. Козловський, інженер

ПП «Астарта Груп», м. Кропивницький, Україн, e-mail: kozlovsky@astarta-groupe.com

Технологічні особливості виготовлення дискових робочих органів ґрунтообробних та посівних машин

Провідні світові виробники досягають високих показників зносостійкості та міцності дисків з борвмісних сталей як їх хімічним складом, так і вибором раціональної технології термічної обробки.

Експериментальні дослідження зразків деталей зі сталі марки 30MnB5 дозволили визначити, що для досягнення максимальних значень твердості достатньо нагріву протягом 15 хвилин до температури 850° С та гартування у воді. Щоб запобігти зниженню твердості та забезпечити необхідну пружність та в'язкість дисків, рекомендується відпускання при температурі 180° С.

Розроблено технологічний процес та виробничу дільницю виготовлення сферичних дисків.
сферичний диск, зносостійкість, міцність, борвмісна сталь, гартування, відпускання

В.Н. Кропивний, проф., канд. техн. наук, **Н.А. Свирень**, проф., д-р техн. наук, **А.В. Кузык**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Амосов**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Н.А. Козловський, інженер

ЧП «Астарта Групп», г. Кропивницький, Україна

Технологические особенности изготовления дисковых рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин

Ведущие мировые производители достигают высоких показателей износоустойчивости и прочности дисков из борсодержащих сталей как их химическим составом, так и выбором рациональной технологии термической обработки.

Экспериментальные исследования образцов деталей из стали марки 30MnB5 позволили определить, что для достижения максимальных значений твердости достаточно нагрева на протяжении 15 минут до температуры 850° С и закалки в воде. Чтобы предотвратить снижение твердости и обеспечить необходимую упругость и вязкость дисков, рекомендуется отпуск при температуре 180° С.

Разработан технологический процесс и производственный участок изготовления сферических дисков.

сферический диск, износоустойкость, прочность, борсодержащая сталь, закалка, отпуск

Постановка проблеми. Обробіток ґрунту та проведення посівних робіт є одним з вирішальних чинників отримання високих врожаїв. Для забезпечення якісної обробки ґрунту та проведення посівних робіт світове сільськогосподарське машинобудування поставляє на ринок великий парк надійної та високопродуктивної техніки. За минулі десятиліття навантаження на робочі органи цього виду техніки зросли не менше ніж у 4

рази. В багатьох випадках українські аграрії віддають перевагу імпортній техніці, враховуючи її більш високий ресурс у порівнянні з вітчизняними зразками та забезпечення якості проведених операцій [1]. Закупівлі сільгоспмашин зарубіжного виробництва для обробки ґрунту та проведення посівних робіт (дискових борін і лушпильників, дисків сошників сівалок), викликає необхідність придбання високоякісних імпортних запасних деталей швидкозношуваних робочих органів, що істотно підвищує собівартість сільськогосподарської продукції. Крім вищого рівня експлуатаційних властивостей імпортна продукція («Kverneland», «Lemken», «Vogel&Noot», «Kuhn», «Agrolux», «OVERUM» тощо), хоча і дорожча, вигідно відрізняється від вітчизняних аналогів розвиненою спеціалізацією стосовно конкретних ґрунтових і кліматичних умов, а також від вирощуваних культур. Аналіз свідчить, що для забезпечення стабільного проведення робіт по підготовці ґрунту та посіву сільськогосподарських культур необхідно імпортувати близько сотні типорозмірів робочих органів. Основними зарубіжними виробниками сферичних та плоских дисків є фірми Lemken і Amazone (ФРН), Vaderstad (Швеція), QUIVOGNE, Kuhn, Agrisem і GrégoireBesson (Франція), Gaspardo, OFAS (Італія), JOHN DEERE, CASE і Sanflorer (США), Bellota (Іспанія), Oncativo SA (Аргентина). Наприклад, італійська фірма OFAS S.p.a. випускає 18 найменувань дисків 207 типорозмірів для ґрунтообробних машин та 21 найменування сошників 155 типорозмірів для посівних машин [2].

На сівалках, дискових боронах, культиваторах, плугах і лушпильниках установлюють увігнуто-опуклі сферичні диски зовнішнім діаметром 410...910 мм при товщині до 8 мм. Застосовуються сферичні диски двох типів: вирізні і гладкі (цільно-крайні). Вирізні диски застосовують на важких боронах, плоскосферичні – на болотних боронах і дискових лушпильниках, а сферичні – на польових боронах, дискових культиваторах і дискових плугах. Крім того, на ряді зразків ґрунтообробної техніки використовують плоскі диски зовнішнім діаметром 255...914 мм при товщині від 2,5 до 12 мм, а також плоскі хвилясті диски (турбодиски) зовнішнім діаметром 340...545 мм при товщині 2,5...4,0 мм. При цьому потреба у деяких типорозмірах є незначною, що ускладнює логістику їх поставок. Це робить задачу імпортозаміщення запасних деталей швидкозношуваних робочих органів досить актуальною. Підприємства сільськогосподарського машинобудування України виготовляють спеціалізовано вузьку номенклатуру швидкозношуваних робочих органів. Для України є доцільним створення спеціалізованого гнучкого виробництва широкого ряду запасних деталей швидкозношуваних робочих органів імпортої сільськогосподарської техніки з сучасних зносостійких матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Робочі органи ґрунтообробних машин виходять з ладу внаслідок абразивного зношування, інтенсивність якого залежить від механічного складу ґрунту, вологості, співвідношення твердості абразиву і матеріалу деталі, структури матеріалу робочої поверхні деталі. Традиційні сталі зазначеного призначення з тимчасовим опором 900–1200 МПа (сталі 40Х, 45, 65Г тощо) не задовольняють сучасним вимогам по ресурсу експлуатації. Вимоги до властивостей таких сталей для виготовлення дисків борін і сівалок, які працюють в умовах абразивного зношування, тривалий час в практиці сільськогосподарського машинобудування визначалися лише за їх рівнем твердості після термічної обробки.

В той же час, залежно від типу ґрунтів, їх ущільненості, засмічення камінням спостерігається низька зносостійкість деталей з цих сталей, передчасне затуплення лезових частин робочих органів, велика кількість поломок і деформацій, пов'язаних з низькими характеристиками міцності, пластичності, пружності, втомної міцності.

З початку XXI-го століття для виробництва деталей швидкозношуваних робочих органів сільськогосподарської техніки знаходять широке застосування високоміцні матеріали з тимчасовим опором понад 1600 МПа. Для виготовлення швидкозношуваних деталей сільськогосподарської техніки на ринку рекламують листовий прокат зі зносостійких сталей торгових марок Raex, Domex, Hardox, Weldox, SSAB Boron тощо. Згідно проспектів компаній-виробників, до складу таких сталей входить 0,18...0,47% вуглецю, 0,4...0,7% кремнію, 1,0...1,7% марганцю, 0,1...1,5% хрому, а також молібден та нікель. Марганець, молібден хром і бор внаслідок блокування дифузійних перетворень підвищують прогартовуємість, що дозволяють отримувати сталь з мартенситною структурою в широкому діапазоні швидкостей охолодження. Дані зносостійкі сталі містять бор на рівні 0,005 %.

Близькі механічні властивості до цих сталей мають більш дешеві сталі марок 30MnB5, 34MnB5, 38MnB5 регламентованих стандартом EN 10083-3:2006(E), що містять оптимальну кількість бору та марганцю, економлячи легуючі елементи (хром, нікель, молібден) [3].

Ефект від мікролегування сталі бором для гальмування розпаду переохолодженого аустеніту пов'язують з тим, що, будучи поверхнево-активним елементом, бор концентрується в дефектних ділянках кристалічної ґратки і створює бар'єрний шар вздовж меж зерен аустеніту. Це забезпечує гальмування утворення феритної фази та розпаду аустеніту і дозволяє широко застосовувати борвмісні сталі для виробництва деталей методом високопродуктивного поєднання гарячого листового штампування в холодних штампах з гартуванням. Технологія термічної обробки передбачає швидке нагрівання в печі до температури ($T > A_{c3}$) 900° С протягом 4...10 хвилин, після якого проводиться гартування з аустенітного стану на мартенситну структуру у водоохолоджуваному штампі. У випадку завершення штампування при температурах нижчих A_{c3} , в структурі, крім мартенситної структурної складової, частково формується бейніт, що дозволяє без проведення відпалу підвищити пластичність і в'язкість сталі при незначному зменшенні її механічних властивостей. В той же час, повільна швидкість охолодження призведе до формування верхнього бейніту та відманштетових феритних структур. При гартуванні борвмісних сталей важливо, щоб швидкість охолодження була достатньо високою для створення кінцевої мартенситної мікроструктури, яка забезпечує високу зносостійкість та міцність при достатньо високій ударній в'язкості. Проведення гартування в штампах дозволяє уникнути похибок форми готових деталей від короблення.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка технологічного процесу та виробничої ділянки із виготовлення сферичних дисків.

Виклад основного матеріалу. Розвиток виробництва високоміцних бористих сталей визначило два основних напрямки їх використання:

- в автомобілебудуванні для виготовлення методом тонколистового гарячого штампування відповідальних силових кузовних деталей та зварних труб невеликого діаметру. Загартування проводиться в процесі формування виробу в водоохолоджуваному штампі;
- в сільськогосподарському машинобудуванні для виготовлення робочих органів, що працюють в умовах абразивного зношування.

Проведено дослідження матеріалу ряду дисків сівалок та борін провідних світових виробників (Lemken, ONCATIVO), які реалізуються сервісними підприємствами м. Кропивницький. Визначали хімічний склад та рівень твердості методом Роквелла (HRC) з обох боків в діаметральному напрямку від краю різальної кромки до центру з кроком 15...20 мм. Встановлено, що хімічний склад досліджених

зразків знаходиться в межах 0,26...0,33% C, 0,15...0,25% Si, 1,4...1,5% Mn, 0,002...0,03% B. За визначеними значеннями хімічного складу досліджувані сталі найбільш близькі до марки 30MnB5 регламентованих стандартом EN 10083-3:2006 (E). Твердість поверхонь аналізованих дисків знаходилася на рівні 45...49 HRC. Коливання твердості при промірюванні у діаметральному напрямку складало від 2 до 6 HRC, при відсутності чіткого зв'язку між значеннями по мірі віддалення від краю заготовки. При обробці результатів вимірювань не встановлено кореляцію між виміряними значеннями твердості та вмістом вуглецю в проаналізованих дискових робочих органах. Очевидно, що основним технологічним параметром, який визначає твердість поверхні робочих органів зі сталі 30MnB5 є ефективність проведення термічної обробки цих сталей [4-8].

Стандарт EN 10083-3:2006 (E) регламентує твердість після гартування на поверхні сталевих листа зі сталі 30MnB5 товщиною до 8 мм в межах 47...56 HRC. Межа текучості з температури гартування 850° C у воді і відпусканні 400...600° C (лист товщиною менше 8 мм) для сталі 30MnB5 становить 800 МПа. Межа міцності після гартування з температури 850° C в воді та відпускання 400...600° C (лист товщиною менше 8 мм) для сталі 30MnB5 становить 950...1500 МПа.

Структура бористої сталі в стані поставки являє собою суміш фериту і перліту, яка визначає недостатній рівень міцності, твердості і, відповідно, абразивної зносостійкості. Виходячи з рекомендацій виробників, за даними інформації проспектів, щодо режимів термообробки таких сталей – гартування з наступним середнім чи високим відпуском [7]. Однак, високий рівень твердості, який спостерігається на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин зі сталі 30MnB5 можливо досягати лише в загартованому (мартенситному) стані при гартуванні з послідовним низьким відпусканням. Забезпечення необхідної твердості і міцності, при збереженні прийнятної рівня пластичності і в'язкості може бути гарантовано лише при ретельному виборі режимів гартування і подальшого відпускання.

При нагріванні під загартування структура повинна складатися повністю з аустеніту – високотемпературної пластичної фази заліза. Нагрівання під гартування рекомендується проводити з температури на 30...50° C вище A_{c3} . За даними фірми Ovaко для сталі 30MnB5 температура A_{c3} становить близько 773° C. При перегріві вище температури приблизно 950° C має місце небажаний ріст зерна аустеніту. Виробники листової сталі 30MnB5 рекомендують період нагрівання під гартування – мінімум 30 хвилин [3].

Умови оптимізації режиму термічної обробки досліджували на зразках розміром 40×40 мм, які були виготовлені із бористої сталі 30MnB5 товщиною 6 мм. Для дослідження пружних властивостей зразки виготовляли зі сталі 30MnB5 розміром 150×20 мм товщиною 3 мм. Сталь мала наступний хімічний склад: 0,29% C, 0,19% Si, 1,4% Mn, до 0,003% B. Термічну обробку проводили в промисловій камерній електричній печі СНО-4.8.3/12,5 без використання захисної атмосфери. Нагрів зразків під гартування з різним часом витримки здійснювали у розігрітому до температур 800...920° C робочому просторі печі. При кожній температурі нагріву досліди повторювали тричі. У якості охолоджуючого середовища при гартуванні використовували воду при температурі 20° C. Відпуск загартованих зразків проводили при температурах 180...380° C з різним часом витримки.

На зразках після термічної обробки визначали значення твердості за методом Роквелла (HRC). Випробування зразків після відпускання на пружність при згині проводили на розривній машині УММ-50. Дослідження мікроструктури зразків проводили на поверхні шліфів загальноприйнятими методами оптичної мікроскопії.

Дослідження твердості загартованих зразків зі сталі 30MnB5 свідчить, що для досягнення максимальних значень твердості достатньо короткочасного нагріву протягом 15 хвилин до температури 850° С. При таких умовах нагріву забезпечується аустенізація структури перед гартуванням, при цьому не спостерігалось не прогартування сталі по товщині досліджуваного зразка (табл. 1). Нагрів до більш високих температур та збільшення часу витримки не забезпечує підвищення твердості зразків, а лише знижує стабільність отриманих результатів.

Причиною такого явища можуть бути процеси перерозподілу бору з міжфазних поверхонь по об'єму зерен та часткове окислення поверхневого шару. Основною структурною складовою у всіх зразках після гартування являвся мартенсит рейкової будови, кристали якого об'єднувалися у пакети шириною 100...150 нм. При цьому у структурі спостерігалася присутність залишкового аустеніту у вигляді прошарків між пакетами мартенситу. При таких умовах для стабільного досягнення більш високих значень твердості необхідно застосовувати бористі сталі з вищим вмістом вуглецю марок 34MnB5, 38MnB5.

Таблиця 1 – Значення твердості зразків зі сталі 30MnB5 після гартування (охолодження у воді)

Середовище гартування	Гартування з температури, °С	Значення твердості, HRC			
		Час витримки T, хв			
		10	15	30	45
Вода	800	47...48	48...48	48...49	48...49
	850	49...50	51	49...50	49
	880	46...47	46...48	46...47	47
	920	47...50	48...51	47...50	47...50

Джерело: розроблено авторами

Метою проведення відпускання зразків з загартованої сталі було забезпечення високої пружності та в'язкості, а також зниження рівня внутрішніх напружень при збереженні високого рівня твердості робочих органів. Дослідження твердості зразків зі сталі 30MnB5 (табл. 2) після проведення відпускання при температурах 180...520° С свідчить, що перевищення температур низького відпускання вище 180° С веде до різкого зниження твердості. Відпускання при температурі 180° С забезпечувало у структурі перехід від мартенситу гартування до мартенситу відпускання, в якому концентрація вуглецю залишається значно вищою від його рівноважного вмісту в α -залізі. Збільшення тривалості витримки відпускання при температурі 180° С до 3-х діб показало підвищення твердості на 1...2 одиниці HRC за рахунок розвитку явища старіння з виділенням незначної кількості дисперсних карбідів. Збільшення температури відпуску до 380° С вело до трансформації мартенситу у нижній бейніт, що супроводжувалося значним зниженням твердості загартованих зразків та розвитком явища відпускнуї крихкості. Враховуючи отримані результати дослідження впливу низького відпуску на властивості загартованої сталі марки 30MnB5, вбачається можливість поєднання цієї операції термічної обробки з нагрівом перед фарбуванням порошковою фарбою до 200° С.

Таблиця 2 – Значення твердості зразків після відпускання загартованих сталей 30MnB5

Температура гартування	Температура відпускання, °C	Твердість після гартування у воді, HRC	Твердість після відпускання, HRC	
			Час витримки T, хв.	
			30	60
850° C	180	51	48	49
	380	51	36	38
	520	51	24	27
880° C	180	47	45	43
	380	47	34	35
	520	47	25	26

Джерело: розроблено авторами

Однією з важливих характеристик матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин є пружність – властивість зразків деформуватися під дією навантаження та відновлювати первинну форму і розміри після її зняття. Випробування зразків зі сталі марки 30MnB5 товщиною 3 мм на пружність після відпускання при згині після відпускання при температурах 180, 380 та 520°C (рис. 1–3). Початковий прогин зразків під навантаженням при відстані між опорами 100 мм складав 14 мм.



Рисунок 1 – Прогин зразків зі сталі марки 30MnB5 під навантаженням

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Вихідне положення зразків зі сталі марки 30MnB5 після зняття навантаження, температура відпускання – 180° C

Джерело: розроблено авторами

Загартовані зразки, які не піддавались відпусканню, та зразки, що піддавались низькому відпусканню 180°C , після зняття навантаження повністю відновлюють попередню форму, що вказує на пружний характер їх деформації. В той же час, у загартованих зразках, які піддавались відпусканню при 180 та 380°C , після зняття навантаження спостерігаються залишкові деформації, що є недопустимим для робочих органів ґрунтообробних машин.



Рисунок 3 – Вихідне положення зразків дисків сошника після зняття навантаження, температура відпускання – 380°C

Джерело: розроблено авторами

Проведено передпроектне пропрацювання виробничої ділянки спеціалізованого гнучкого виробництва широкого ряду запасних дискових деталей швидкозношуваних робочих органів імпоротної сільськогосподарської техніки на базі сучасних прогресивних технологій. Склад технологічного обладнання для виробничої ділянки визначали з можливості виготовлення найбільш технологічно складних за формою увігнуто-опуклих вирізних сферичних дисків зовнішнім діаметром до 910 мм при товщині до 8 мм .

Для формоутворення дисків передбачено застосування розкрою заготовок з вирізкою западин по зовнішньому контуру диска та внутрішніх отворів на лазерному верстаті з волоконним лазером потужністю 2 кВт . Застосування лазерного різання є альтернативою застосуванню традиційного листового штампування, яке при широкій номенклатурі продукції вимагає утримання вартісного штампового оснащення. До складу комплексу лазерного різання доцільно включати систему автоматичного завантаження/вивантаження листових заготовок розміром до $3000 \times 1500\text{ мм}$. В ділянку лазерного різання додатково має входити генератор кисню, подачу якого в зону різання необхідно здійснювати для підвищення продуктивності обробки.

Ріжуча крайка дискових робочих органів має бути загостреною до товщини $1\text{--}2\text{ мм}$ і кута до 40° . Заточування ріжучих крайок по основній крайці на дискових заготовках різного діаметру передбачено здійснювати на токарно-карусельному одностійковому універсальному верстаті моделі 1510 стандартними токарними різцями. Верстат додатково має бути обладнаний пневматичним притискним пристосуванням для закріплення на столі дискової заготовки. Альтернативною операцією обробки різанням ріжучої крайки при обмеженій номенклатурі продукції є пластичне деформування методом вальцювання. Однак при використанні такого варіанту обробки необхідно використовувати спеціалізованого обладнання відповідного типорозміру, виготовлення якого може бути здійснене за спеціальним замовленням.

При виробництві увігнуто-опуклих сферичних дисків типу «ромашка» передбачається додаткова операція по формуванню ріжучих крайок у кожній з западин. При обмеженій номенклатурі продукції, ріжучі крайки утворюють шляхом застосування операції листового штампування «вирубання» окремо кожної западини. Дану операцію проводять на пресах у спеціальних штампах, де заготовка встановлюється під

кутом $40\text{--}45^\circ$ до напрямку руху пуансона. Це дозволяє отримувати диски із загостреними крайками по контуру западин.

При використанні лазерного різання заготовка вже має западини по контуру і потребує лише виконання заточення їх крайок. Проведений аналіз показав, що найбільш ефективно при радіусній формі поверхонь западин їх крайки в умовах дрібносерійного виробництва заточувати методом фрезерування на вертикально-фрезерному безконсольному верстаті, наприклад моделі 6540, з використанням у якості інструменту стандартних торцевих фрез. При цьому необхідно використовувати пристосування для закріплення заготовки на столі верстату та її періодичного ступінчастого повороту для обробки крайки наступної западини.

Після повного завершення механічної обробки заготовки деталей проходять нагрівання до температури гартування $850\text{--}900^\circ\text{C}$ у газополуменовій прохідній термічній печі. Температура нагріву під гартування повинна бути вищою на 50°C за встановлену експериментальним шляхом для компенсації втрати температури при переносі заготовки з печі у гартувальний штамп. Продуктивність печі визначається, виходячи з продуктивності операції гартування заготовок. У випадку нагріву заготовок дискових робочих органів на виході термічної установки продуктивність печі повинна складати близько 1 заготовка за хвилину. Для гартування доцільним є застосування газової прохідної печі ТермоМастер®-КО-10.40.1/960-ИЗ-Н виробництва ПрАТ «Інститут Керамічного Машинобудування «Кераммаш»» з максимальною робочою температурою 960°C та довжиною робочого простору – 25 м, ширина 1 м (рис. 4) [9].

Особливістю гартування дискових заготовок є їх висока схильність до короблення і поводки. Особливо це характерно для випадку гартування у водному середовищі. Аналіз технологій виробництва дискових робочих органів провідними світовими виробничниками свідчить про застосування гартування заготовок у гартувальних штампах. При гартуванні плоских дисків, як правило, заготовку розміщують на нижню плоску металеву перфоровану плиту штампа, притискають зверху верхньою плоскою перфорованою плитою і занурюють у бак з водою. Тривалість гартування у воді 30...40 секунд, далі штамп піднімається на поверхню охолоджувальної ванни, розкривається, і з нього видаляють загартовану заготовку.

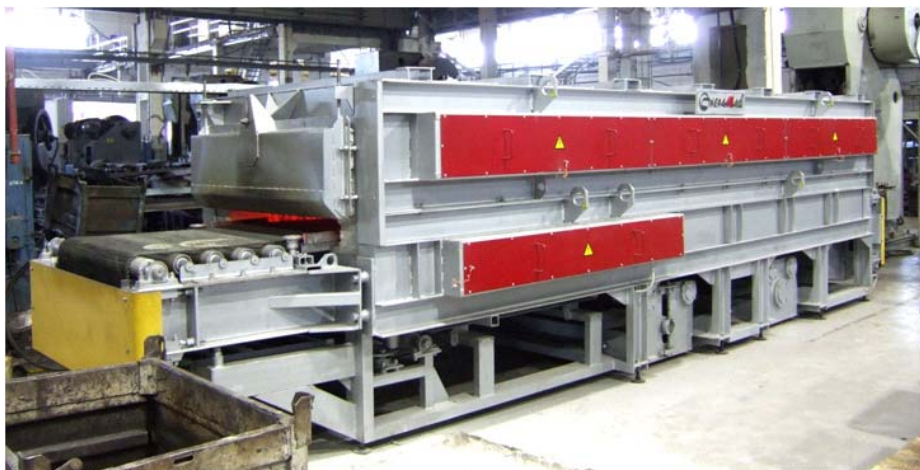


Рисунок 4 – Загальний вигляд газової печі ТермоГаз виробництва ПрАТ «Інститут Керамічного Машинобудування «Кераммаш»»

Джерело: [9]

Для виробництва увігнуто-опуклих сферичних дисків застосовується перспективне технологічне рішення, яке поєднує утворення готової форми деталей в процесі гарячого штампування і подальшу термічну обробку в гартувальних штампах. У технологічному процесі операція термічної обробки дисків з використанням інтенсивного охолодження потоком рідини є регламентуючою технологічною операцією, яка визначає технічний рівень виробу. У якості обладнання використовують спеціально спроектовані гартувальні преса, які поєднують гаряче штампування у холодних штампах і послідує гартування дискових робочих органів. Конструкція гідравлічних гартувальних пресів використовує два циліндри: робочий (з номінальним зусиллям 50 тс) на верхній траверсі, який виконує об'ємне формування, опорний в столі преса, щоб після формування занурити штамп з диском у гартувальну ванну місткістю 2 м³. Шток опорного циліндра проходить через ущільнення гартувальної ванни і з'єднується з матрицею штампа.

Завантаження в штамп гарячої заготовки здійснюється маніпулятором завантаження. Далі опускається пуансон, і йде формоутворююча операція при нерухомій матриці (рис. 5). По завершенні формування пуансон і матриця опускаються в гартувальну ванну, і відбувається гартування, при цьому зусилля затиску, що передається пуансоном і матрицею на виріб, не дає розвиватися викривленням. По закінченню гартування пуансон, готова деталь та матриця піднімаються з гартувальної ванни. Вивантаження готової деталі проводиться маніпулятором вивантаження.

Для низького відпускання загартованих дисків доцільно застосовувати електричні печі, серед яких найбільша перевага характерна для печі з викатним подом. Така піч зручна для завантаження зібраних у стопку дисків, а також забезпечує точне регулювання та стабільність температур по робочому об'ємі печі. Однією з таких є піч опору з викатним подом фірми «Бортек» (м. Київ). Електропіч СДО-10.13.10/4,5 І1 [10] призначена для проведення різних видів низькотемпературної обробки різних матеріалів в стаціонарних умовах. Для зменшення градієнта температури за обсягом камери печі, під склепінням печі встановлений вентилятор, що забезпечує циркуляцію повітря у вертикальній площині.



Рисунок 5 – Загальний вигляд гартувального штампа для виробництва увігнуто-опуклих сферичних дисків

Джерело: розроблено авторами з використанням [9]

Після термічної обробки деталі робочих органів перед фарбуванням мають пройти очищення поверхні. Найбільш доцільним є проведення очищення у дробеструминній камері, оскільки використання обробки у піскоструминній камері викликає підвищене пиловиділення та погіршення умов праці на виробничій дільниці.

Обов'язковим елементом виробничої дільниці виробництва дискових робочих органів ґрунтообробної техніки є контрольна дільниця, на якій передбачається:

- 1) контроль твердості дисків з використанням твердоміра по Роквеллу;
- 2) контроль відхилення форми диска в результаті короблення (биття) з використанням мікрометричних вимірювальних стійок;
- 3) випробування дисків на пружність при згинанні з використанням гідравлічного преса зусиллям 10...20 тс та відповідних пристосувань.

Висновки.

1. Вивчено ринок дискових робочих органів ґрунтообробних та посівних машин, технологічні процеси виготовлення яких доцільно вдосконалити.

2. Проведено теоретичне та експериментальне дослідження будови, структури та властивостей матеріалу зразків сферичних дисків імпортової сільськогосподарської техніки. Обґрунтовано вибір бористої сталі марки 30MnB5 для їх виготовлення.

3. Розроблено вдосконалений технологічний процес виготовлення сферичних дисків ґрунтообробної техніки. Рекомендовано їх формоутворення гарячим штампуванням у холодних штампах та інтенсивним гартуванням у водяній ванні.

4. Проведено проектну розробку дільниці виробництва дискових робочих органів ґрунтообробної та посівної техніки.

Список літератури

1. Петренко І. Дискові ґрунтообробні знаряддя. *Агробізнес Сьогодні*. 2013. 29 квітня. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/mechanizatsiia-apk/item/970-diskovi-gruntoobrobni-znaryaddya.html> (дата звернення: 5.11.2020)
2. Discs for harrows ploughs and seeders. *OFAS*. URL: <http://www.ofas.it/en/tillage-parts/discs-for-harrows-ploughs-and-seeders.html> (дата звернення: 5.11.2020)
3. 30MnB5. Boron alloyed quenched and tempered steel. Salzgitter Flachstahl. URL: https://www.salgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationen/material/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/30mn5.pdf (дата звернення: 5.11.2020)
4. Joutsenvaara J., Vierelä R. Future Materials in Agricultural Construction: Technical report. *Kemi-Tornio University of Applied Sciences*. Serie B. Reports 14/2013. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/68462/joutsenvaara_vierela_B_14_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y (дата звернення: 5.11.2020)
5. Karbasian H., Tekkaya A.E. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. №210. pp. 2103–2118.
6. Juna H.J., Kanga J.S., Seob D.H., Kangb K.B., Park C.G. Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels. *Materials Science and Engineering*. 2006. A 422. pp. 157–162.
7. Lee J.B., Kang N., Park J.T., Ahn S.T., Park A.D., etc. Kinetics of carbide formation for quenching and tempering steels during high-frequency induction heat treatment. *Materials Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 129. P. 365–370.
8. The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. K. Pawlak, B. Białobrzaska, Ł. Konat. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. V. 16, I. 4. P. 913–926. URL: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003> (дата звернення: 5.11.2020)
9. Пiч електрична конвейерна ТермоМастер®-КО-10.40.1/960. ПрАТ Інститут Керамічного Машинобудування «Кераммаш». URL: <http://kerammash.com.ua/ua/pdfs/reflist2020-kerammash-ua.pdf> (дата звернення: 5.11.2020)

10. Електропід з викотним подом СДО-10.13.10/4,5 ІІ та вентилятором. URL: <http://bortek.ua/ua/promyshlennye-ehlektropechi/pechi-vykatnym-podom-600/sdo-10-13-10-450> (дата звернення: 5.11.2020)

References

1. Petrenko, I. (2013). Dy'skovi g'runtoobrobni znaryaddya [Disk tillage tools]. *Agrobiznes S'ogodni-Agribusiness Today*. 29 kvitnya. Retrieved from <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/970-diskovi-gruntoobrobni-znaryaddya.html> [in Ukrainian].
2. Discs for harrows ploughs and seeders. *OFAS*. Retrieved from <http://www.ofas.it/en/tillage-parts/discs-for-harrows-ploughs-and-seeders.html> [in English].
3. 30MnB5. Boron alloyed quenched and tempered steel. *Salzgitter Flachstahl*. Retrieved from https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationen/material/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/30mn5.pdf [in English].
4. Joutsenvaara J., Vierelä R. (2013) Future Materials in Agricultural Construction: Technical report. *Kemi-Tornio University of Applied Sciences*. Serie B. Reports 14/2013. Retrieved from https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/68462/joutsenvaara_vierela_B_14_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y [in English].
5. Karbasian, H. & Tekkaya, A.E. (2010). A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. №210. pp. 2103–2118 [in English].
6. Juna, H.J., Kanga, J.S., Seob, D.H., Kangb, K.B. & Park, C.G. (2006). Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels. *Materials Science and Engineering*. A 422. pp. 157–162 [in English].
7. Lee, J.B., Kang, N., Park, J.T., Ahn, S.T., Park, A.D., etc. (2011). Kinetics of carbide formation for quenching and tempering steels during high-frequency induction heat treatment. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 129, 365–370 [in English].
8. Pawlak, K., Białobrzęska, B. & Konat, Ł. (2016). The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 16, I. 4, 913–926. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003> [in English].
9. Pich elektrychna konvejerna TermoMaster®-KO-10.40.1/960. PrAT Y'nstytut Keramichnogo Mashynobuduvannya «Kerammash» [Electric conveyor furnace TermoMaster®-KO-10.40.1/960. PJSC Institute of Ceramic Mechanical Engineering "Kerammash"]. Retrieved from <http://kerammash.com.ua/ua/pdfs/reflist2020-kerammash-ua.pdf> [in Ukrainian]
10. Elektropich z vy'kotny'm podom SDO-10.13.10/4,5 Y`I ta venty`lyatorom [Electric furnace with a pull-out hearth SDO-10.13.10 / 4,5 II and a fan]. Retrieved from <http://bortek.ua/ua/promyshlennye-ehlektropechi/pechi-vykatnym-podom-600/sdo-10-13-10-450> [in Ukrainian]

Volodymyr Kropivny, Prof., PhD tech. sci., **Mykola Sviren**, Prof., DSci., **Olexandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mykola Kozlovsky, engineer

PE "Astarta Group", Kropyvnytskyi, Ukraine

Technological Features of the Manufacture of Disk Working Bodies of Tillage and Seeding Machines

The purpose of this study is to improve the technology of manufacturing spherical disk working bodies of tillage machines to increase their wear resistance and strength.

The world's leading manufacturers achieve high wear resistance and strength of discs made of boron-containing steels both in their chemical composition and the choice of rational heat treatment technology.

Experimental studies of 30MnB5 steel parts revealed that heating for 15 minutes to a temperature of 850°C and quenching in water was sufficient to achieve maximum hardness values. To prevent hardness reduction and to ensure the necessary elasticity and viscosity of the discs, it is recommended to temper at a temperature of 180°C and combine with heat before painting with powder paint. The application of cutting blanks with cutting of depressions along the outer contour of the disk and internal holes on the laser machine, as well as the formation of the finished shape of parts in the process of hot stamping and subsequent heat treatment in quenching dies.

1. The market of disk working bodies of tillage and sowing machines is studied, technological processes of manufacturing of which it is expedient to improve.

2. Theoretical and experimental study of the structure, structure and material properties of samples of spherical disks of imported agricultural machinery. The choice of 30MnB5 pine steel for their production is substantiated.

3. The improved technological process of manufacturing spherical disks is developed. It is recommended to form them by hot stamping in cold dies and intensive hardening in a water bath.

4. The project development of the section of production of disk working bodies of tillage and sowing equipment is carried out.

spherical disk, wear resistance, strength, boron-containing steel, hardening, tempering

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 621.81

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.151-158>

Ю.А. Невдаха, доц., канд. техн. наук, **В.О. Дубовик**, доц., канд. техн. наук,
Н.А. Невдаха, **Ф.Й. Златопольський**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: uanevdakha@ukr.net

До розрахунку зубців прямозубих циліндричних передач на згин

В роботі аналізуються розрахункові схеми циліндричної прямозубої передачі на згин зубців. Розглядається найбільш поширена розрахункова схема злому зубця, де небезпечний переріз злому зуба відбувається у основі ножки вище кола діаметра западини зубців. На практиці реальний же злом зубця лежить нижче діаметра западини зубців і має опуклу форму перерізу. Для більш точного розрахунку зубців на згин досліджували коефіцієнт форми зубців. В результаті встановлено, що коефіцієнт форми зуба зменшується зі збільшенням кількості зубців.

зубчасті передачі, зубець, злом, небезпечний переріз, напруження, згин, навантаження, зусилля

Ю.А. Невдаха, доц., канд. техн. наук, **В.А. Дубовик**, доц., канд. техн. наук, **Н.А. Невдаха**,
Ф.И. Златопольский, проф., канд. техн. наук

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

К расчету зубьев прямозубых цилиндрических передач на изгиб

В работе анализируются расчетные схемы цилиндрической прямозубой передачи на изгиб зубцов. Рассматривается наиболее распространенная расчетная схема излома зубцов, где опасное сечение излома зубьев происходит в основе ножки выше круга диаметра впадины зубцов. На практике реальный же излом зубьев лежит ниже диаметра впадины зубьев и имеет выпуклую форму сечения. Для более точного расчета зубьев на изгиб исследовали коэффициент формы зубьев. В результате установлено, что коэффициент формы зуба уменьшается с увеличением количества зубьев.

зубчастые передачи, зуб, злом, опасное сечение, напряжения, изгиб, нагрузки, усилия

Постановка проблеми. При розрахунку зубців на згин розрахунок ведуть за напруженнями, що виникають біля основи зубця, при навантаженні прикладеному до вершини зуба. Розглядаємо при цьому найбільш поширену схему розрахунку. Точку прикладання навантаження переноситься на вісь симетрії зуба і розкладається на дві взаємно перпендикулярні складові. Тому небезпечний переріз розміщений в основі зубця у зоні найбільшої концентрації напружень. Розрахункова схема має ряд недоліків, які полягають перш за все в тому, що дійсний небезпечний переріз лежить нижче перерізу кола впадин зубців. Це підтверджується тим, що тріщини втоми утворюють кут з кривою навантаження, близький до прямого, і злом зуба має опуклу форму.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Значний науковий і практичний внесок у вдосконалення розрахунку зубців на згин мають роботи В.Т. Павлище, Л.Н. Решетова, В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Березовського, Д.В. Чернилевського, М.С. Петрова, Н.Ф. Кіркача, Р.А. Баласаняна, П.Г. Гузенкова, М.М. Іванова, В.М. Іванова та інші. В своїх роботах розрахунки зубчастих коліс на міцність при згині вони використовували формулу, яка встановлювала залежність між розмірами зубців і діючим коловим навантаженням на зуб. На нашу думку, в основу виведення цієї формули були покладені деякі недоліки і припущення про те, що небезпечний переріз зуба знаходиться в його основі, що все навантаження несе один зуб.

При виведенні розрахункових формул пропонувалося, що навантаження зосереджене біля вершини головки зуба і передається тільки одним зубом. Насправді ж при точному виконанні зубців можливість зосередження всієї сили на верхівці тільки одного зуба виключена, так як в момент, відповідний виходу зуба із зачеплення або входу його в зачеплення, в роботі знаходиться не менше двох зубців кожного колеса.

В даний час розрахунок зубчастих коліс уточнюють, враховуючи ряд факторів, які впливають на міцність зубців.

Постановка завдання. Метою роботи є покращення розрахунків прямозубих циліндричних коліс на згин, за рахунок того, що існуючі формули не дають дійсної величини максимального напруження, а епюра не відповідає реальному закону розподілу напружень. З метою отримання задовільних результатів правильніше проводити розрахунок зубців по максимальним місцевим напруженням. Об'єднавши коефіцієнти і обґрунтувавши розрахункову залежність для визначення величини коефіцієнта форми зуба при навантаженні, прикладеного в будь-якій точці робочого профілю зуба, отримати формули для згинальної міцності зубців шестерні і колеса.

Виклад основного матеріалу. Зубчасті передачі відносяться до найбільш розповсюджених груп механічних передач. Зубчасті колеса використовують в широкому діапазоні областей і умов роботи, від приладобудування до самих потужних машин з діаметрами коліс від декількох міліметрів до 10 метрів і більше.

Циліндричні зубчасті передачі застосовують для перетворення і передачі обертового моменту між валами осі яких паралельні. Розрахунок зубчастих коліс зводиться до виконання умови за контактними напруженнями в зубцях σ_H , щоб вони були менші, або дорівнювали допустимим $[\sigma]_H$. Розрахунок ведуть для зачеплення в полюсі, так як викришування зубців починається з полюсної лінії (на ножці зубця). Полюсна лінія в прямозубих передачах знаходиться в зоні однопарного зачеплення [1].

При розрахунку зубців на згин, зубець розглядаємо як консольну балку з навантаженням, яке розподіляється по лінії контакту. При роботі лінія контакту переміщається по висоті зубця і змінює плече сили. Розглянемо випадок коли в зачепленні знаходиться одночасно два зубця.

При підході будь-якої пари зубців до кінцевої точки зачеплення, теоретично (оскільки коефіцієнт перекриття $\varepsilon > 1$), в передачі навантаження сприймає дві пари зубців (рис.1), так як друга пара зубців вже буде знаходитися в зачепленні. В реальних же передачах неминучі відхилення розмірів зубчастих коліс (наприклад, різні основні кроки P_1 і P_2) що призводить до появи зазорів, величини яких при прикладанні навантаження зменшуються, або навіть повністю компенсуються завдяки деформаціям згину і зсуву зубців, а також деформації в зоні контакту.

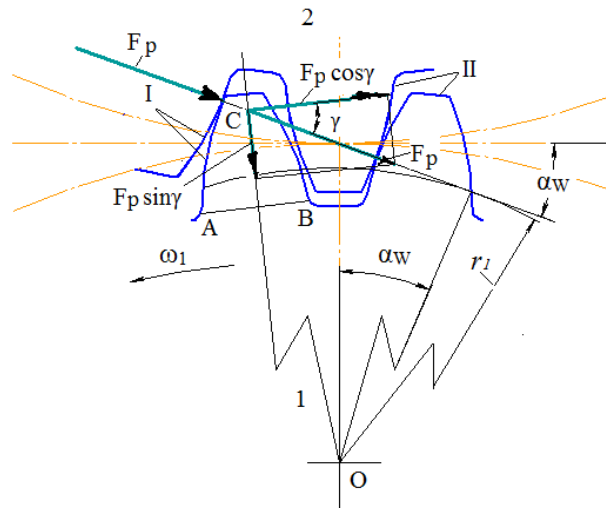


Рисунок 1 – До розрахунку зубців на згин, розрахункова схема

Джерело: розроблено авторами з використанням [1, 2, 8]

Але в передачах, які відповідають 8-й і 9-й і частково 7-й ступеням точності по ДСТУ 1643-96 вказаної компенсації бічного зазору зазвичай не відбувається, і все або майже все навантаження сприймається однією парою зубців.

Тому при розрахунку зубців на згин розрахунок ведуть за напруженнями, що виникають у основі зубця, при навантаженні, прикладеному у вершині зуба. Зуб ведучого колеса 1 буде відчувати це максимальне напруження в кінці зачеплення (рис. 1), а зуб веденого колеса 2 – на початку зачеплення [2 - 4].

Розглянемо спочатку найбільш поширену схему розрахунку. Точку прикладання питомого навантаження F_p переносять на вісь симетрії зуба і розкладають (рис. 2) на дві взаємно перпендикулярні складові: $F_p \cdot \cos \gamma$ – перпендикулярно осі симетрії і $F_p \cdot \sin \gamma$ – вздовж осі симетрії зуба. Перша з них викликає згин зуба, друга – стискання. При знаходженні положення небезпечного перерізу можна знехтувати впливом стискаючої сили $F_p \cdot \sin \gamma$, так як напруження стиснення σ_{CT} мале в порівнянні з напруженням згину $\sigma_{зг}$. Тому небезпечний переріз зуба визначиться точками дотику (точки А і В рис. 2) вписаного в нього квадратичної параболи (тіло рівного опору згинанню), вершина якої співпадає з точкою прикладання F_p на осі симетрії зуба.

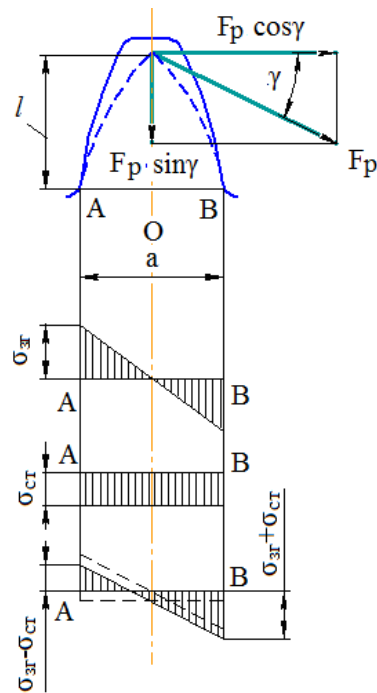


Рисунок 2 – До розрахунку зубців на згин, епюри напружень

Джерело: розроблено авторами з використанням [3 - 7]

Як видно із епюри сумарних напружень (рис. 2), максимальне нормальне напруження виникає на неробочому боці зуба – стороні стиснення, проте, так як тріщини втоми виникають у основі зубця на стороні розтягування, розрахунок проводиться по напруженню розтягу на робочій стороні.

Враховуючи нерівномірний розподіл навантаження по довжині контактної лінії і додаткове динамічне зусилля в зачепленні, в розрахунку замість питомого контактного навантаження візьмемо значення розрахункового навантаження:

$$F_p = K_F \cdot F_{cp}, \quad (1)$$

де коефіцієнт K_F може бути представлений у вигляді добутку двох коефіцієнтів:

$$K_F = K_{F\beta} \cdot K_{FV}. \quad (2)$$

Тут $K_{F\beta}$ – коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу навантаження по ширині зубчатого вінця;

K_{FV} – коефіцієнт, який враховує додаткові динамічні навантаження в зачепленні;

F_{cp} – середнє питоме контактне навантаження, визначене в припущенні рівномірного розподілу навантаження по лінії контакту за формулою:

$$F_{cp} = \frac{F_n}{L_k} = \frac{2T_1}{d_1 \cdot L_k \cdot \cos \alpha_w}, \quad (3)$$

де F_n – нормальне зусилля, діюче на зубці;

T_1 – момент, діючий на валу шестерні;

L_k – сумарна довжина контактних ліній.

В некоригованих передачах при зачепленні в полюсі все навантаження передається однією парою зубців, тому довжина контактної лінії L_k дорівнює ширині B зубчастого вінця. В цьому випадку розрахункове навантаження буде рівне:

$$F_p = \frac{2T_1 K_F}{d_1 \cdot B \cdot \cos \alpha_w}. \quad (4)$$

Величина питомого розрахункового навантаження F_p , вказаного на рис. 1 і 2, визначається коефіцієнтом K_F , який визначається за формулою (2), що враховує вплив нерівномірності розподілу навантаження за шириною зубчастого вінця і додаткових динамічних зусиль в зачепленні на згинальну міцність зубців.

Значення коефіцієнта K_{FV} достатньо складне і для розрахунків зубчастих передач можна використати значення наведені у [5 - 8]. Величина коефіцієнта $K_{F\beta}$ визначається за кривими відповідних графіків для циліндричних передач [5]. Напруження розтягу, яке виникає на робочій стороні зубця в небезпечному перерізі, приймаючи гіпотезу невикривлення плоских перерізів, нормальних до осі симетрії зуба, може бути записано у виді:

$$\sigma = \sigma_{32} - \sigma_{cm} = \frac{6 \cdot F_p \cdot \cos \gamma}{a^2} \cdot l - \frac{6 \cdot F_p \cdot \sin \gamma}{a} \leq [\sigma]. \quad (5)$$

Підставляючи значення F_p , отримаємо:

$$\sigma = \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_F}{B \cdot d_1 \cdot m} \cdot \left(\frac{6 \cdot l \cdot m \cdot \cos \gamma}{a^2 \cdot \cos \alpha_w} - \frac{m \cdot \sin \gamma}{a \cdot \cos \alpha_w} \right) \leq [\sigma], \quad (6)$$

або

$$\sigma = \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_F}{B \cdot d_1 \cdot m \cdot y} \leq [\sigma], \quad (7)$$

де

$$y = \frac{1}{\frac{6 \cdot l \cdot m \cdot \cos \gamma}{a^2 \cdot \cos \alpha_w} - \frac{m \cdot \sin \gamma}{a \cdot \cos \alpha_w}}. \quad (8)$$

Величина коефіцієнта y залежить від форми зуба та розташування точки, в якій прикладається зусилля. У свою чергу форма зубця при даному початковому контурі, тобто при фіксованому профільному куті α_w , залежить від числа зубців Z і коефіцієнта корекції x і не залежить від m , оскільки при заданих Z і x зубці різних модулів є подібними геометричними фігурами. В розрахунковій практиці визначення величини y робиться за допомогою таблиць або графіків [1 - 7].

Гіпотеза невикривлення плоских перерізів, нормальних до осі симетрії балки, несправедлива для коротких балок змінного перерізу, тому представлена на рис. 2 сумарна епюра не відповідає реальному закону розподілу напружень, а формула (6) не дає дійсної величини максимального напруження. У основі зуба є місце концентрації напруження (рис. 3), причому величина місцевих напружень зростає зі зменшенням радіусу кривизни r перехідної кривої зуба.

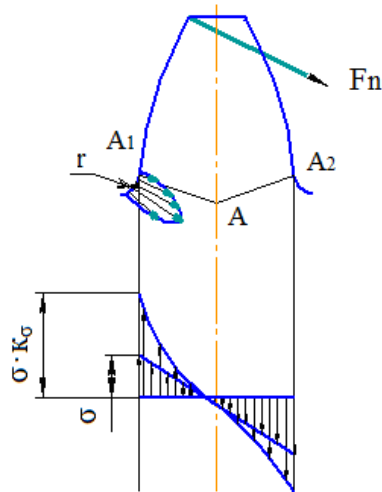


Рисунок 3 – До розрахунку зубців на згин по місцевим напруженням
Джерело: розроблено авторами з використанням [1 – 8]

З метою отримання задовільних результатів в розрахункові залежності (зазвичай в виразі для визначення допустимого напруження) вводять ефективні коефіцієнти концентрації K_σ , або частіше (через обмеженість даних про величини K_σ) теоретичні коефіцієнти концентрації α_σ . В результаті при знакозмінному симетричному (реверсивному) навантаженні отримаємо:

$$\sigma = \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_F}{B \cdot d_1 \cdot m \cdot y} \leq \frac{[\sigma_{-1}]_{F_{ном.переріз}}}{\alpha_\sigma}. \quad (9)$$

Але навіть при врахуванні концентрації напруження в основі зуба наведена розрахункова схема зберігає ряд недоліків, які полягають перш за все в тому, що дійсний небезпечний переріз лежить нижче перерізу, визначеного зазначеним вище способом, особливо при великих x , і, крім того, прийнята гіпотеза не справджується. Останнє підтверджується тим, що тріщини втоми утворюють кут з кривою навантаження, близький до прямого, і злам зуба має опуклу форму (рис. 4).



Рисунок 4 – Дійсний злам зуба має опуклу форму
Джерело: розроблено авторами

Далі розрахунок ведеться за умовним номінальним напруженням, що значно відрізняється від дійсних максимальних напружень, і ускладнюється необхідністю мати для всіх комбінацій z і x (при різних точках прикладення зусилля) не тільки значення

y , а й величини α_σ . Окремий облік коефіцієнтів y і α_σ ускладнює підбір x , які забезпечують рівномірність по згину зубців шестірні і колеса. Принципово правильніше проводити розрахунок зубців по максимальним місцевим напруженням.

Якщо прийняти коефіцієнт форми зуба при розрахунку на згин у вигляді співвідношення $Y = \frac{y}{\alpha_\sigma}$ і скористатися гіпотезою ломаних перерізів, теоретично можна

отримати розрахункову залежність для визначення величини коефіцієнта Y при різних значеннях Z і x прикладеного в будь-якій точці робочого профілю зуба.

Тоді перевірку згинальної міцності зубців шестірні і колеса можна виконувати за виразами:

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_F}{B \cdot d_1 \cdot m \cdot Y_1} \leq [\sigma]_{F1} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{2 \cdot T_1 \cdot K_F}{B \cdot d_1 \cdot m \cdot Y_2} = \sigma_1 \cdot \frac{Y_1}{Y_2} \leq [\sigma]_{F2}$$

Перехід до розрахунку згинальної міцності зубців з використанням коефіцієнтів Y забезпечує можливість безпосередньої оцінки впливу на згинальну міцність різних параметрів. Наприклад, з переходом від $Z = 12$ до $Z = 100$ величина Y зростає, оскільки зі збільшенням Z не тільки збільшується товщина зубця у основі, а й зменшується радіус кривизни перехідної кривої, що в свою чергу збільшує концентрацію напруження у основі зуба, отже в наслідок цього згинальна міцність зростає і точно на таке ж значення збільшиться коефіцієнт Y . Таким чином зростання коефіцієнта Y зі збільшенням x безпосередньо характеризує зростаючу при цьому згинальну міцність зубців.

Згинальна міцність в значній мірі залежить від термічної обробки поверхні зубця біля основи, чистоти і способу кінцевої обробки. Значне збільшення згинальної міцності отримують при поверхневому загартуванні всієї западини і при застосуванні дробоструменевому наклепу.

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що коефіцієнт форми зуба Y зменшується зі збільшенням кількості зубів z . Цей результат був очікуваний, оскільки із збільшенням кількості зубів зменшується кут між зубами, і сусідні зуби сприймають частину напруження, що виникає в навантаженому зубі. Наведені вище уточнені розрахунки зубців на згин відображають сприятливий вплив підвищення точності виготовлення зубців.

Список літератури

1. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. К.: «Вища школа», 1993. 356 с.
2. Решетов Л.Н. Детали машин: Учебник для студентов Машиностроительных и механических специальности вузов. 4-е изд., перераб. и дон. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
3. Гузенков П.Г. Детали машин: учебник для студ. высш. технических учебных заведений. М.: Высшая школа, 1982. 351 с.
4. Березовский Ю.Н., Чернилевский Д.В., Петров М.С. Детали машин: учебник для машиностроительных техникумов. М.: Машиностроение, 1983. 384 с.
5. Иванов М.Н., Иванов В.Н. Детали машин: Курсовое проектирование. М.: Высшая школа, 1975. 551 с.
6. Киркач Н.Ф., Баласанян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин. Часть 1. Харьков. Вища школа, 1987. 336 с.

7. Добровольский В.А. Детали машин: учебное пособие для технических высших учебных заведений УССР. К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1954. 599 с.
8. Мархель И.И. Детали машин. Программированное учебное пособие для средних специальных заведений. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.

Referencis

1. Pavlysche, V.T. (1993). *Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalej mashyn* [Fundamentals of design and calculation of machine parts]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
2. Reshetov, L.N. (1989). *Machine parts*. (4-th ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Guzenkov, P.G. (1982). *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].
4. Berezovskij, Ju.N., Chernilevskij, D.V. & Petrov, M.S. (1983). *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Ivanov, M.N. & Ivanov, V.N. (1975). *Detali mashin: Kursovoe proektirovanie* [Machine parts: Course design]. Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].
6. Kirkach, N.F. & Balasanjan, R.A. (1987). *Raschet i proektirovanie detalej mashin* [Calculation and design of machine parts]. (Issue 1). Har'kov. Vishha shkola. [in Russian].
7. Dobovol'skij, V.A. (1954). *Detali mashin: uchebnoe posobie dlja tehniceskikh vysshih uchebnyh zavedenij USSR*. Kiev: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniceskij literatury USSR [in Russian].
8. Marhel', I.I. (1986). *Machine parts. Programmed study guide for secondary specialized institutions*. (2d ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

Yurii Nevdakha, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dubovyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Nevdakha**, **Fedor Zlatopolskiy**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Before Calculating the Teeth of Spur gears on the Bend

The aim of the work is to improve the calculations of spur cylindrical wheels per bend, due to the fact that the existing formulas do not give the actual value of the maximum stress, and the diagram does not correspond to the real law of stress distribution. In order to obtain satisfactory results, it is more correct to calculate the teeth at the maximum local stress. Combining the coefficients and substantiating the calculated dependence to determine the value of the coefficient of the shape of the tooth under load, applied at any point of the working profile of the tooth, to obtain formulas for the bending strength of the teeth of the gear and wheel.

When calculating the bending teeth, the calculation is based on the stresses arising at the base of the tooth, under the load applied at the top of the tooth. Consider first the most common calculation scheme. Dangerous section of the tooth as seen from the plot of total stresses indicates that the maximum normal stress occurs on the non-working side of the tooth - the compression side, however, since fatigue cracks occur at the base of the tooth on the stretching side, the calculation is based on tensile stress on the working side. The hypothesis of non-curvature of flat sections is unfair for short beams of variable cross section, so the total diagram does not correspond to the real law of stress distribution. But at the base of the tooth near the transition curve is the place of stress concentration. The actual dangerous cross-section lies below the cross-section of the depression, this is confirmed by the fact that the fatigue cracks form an angle with the load curve close to straight, and the fracture of the tooth has a convex shape. In this case, it is more correct to calculate the teeth at the maximum local stress. Combining the coefficients obtained a calculated dependence to determine the value of the coefficient of the shape of the tooth under load, applied at any point of the working profile of the tooth.

As a result of the study it was found that the coefficient of tooth shape decreases with increasing number of teeth. This result was expected because as the number of teeth increases, the angle between the teeth decreases, and neighboring teeth perceive part of the stress that occurs in the loaded tooth. The formulas for checking the bending strength of gear teeth and wheels are obtained. The above refinement calculations of the teeth on the bend reflect the beneficial effect of improving the accuracy of the manufacture of teeth.

gears, prong, fracture, dangerous cross section, stress, bending, load, effort

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

UDC 321.30.06

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.159-164>

Kyryl Shcherbyna, Senior Lecturer, PhD tech. sci., **Andrii Hrechka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vitalii Mazhara**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiyna Diachenko**, Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: kir2912s@ukr.net

Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks

The article considers the process of kinematics in the formation of the grid of traces taking into account the influence on microrelief of the formed surface. Schemes of interaction of the machined surface with diamond-abrasive sticks, which are positioned at different angles and their influence on the formation of the microrelief of the machined holes have been given. The calculation scheme of positioning diamond-abrasive sticks at different angles is presented. On this basis, mathematical models of density of the formed grid of traces were obtained. The study of the influence of the inclination angle of diamond-abrasive sticks on the formation of the macrorelief of the machined hole is also presented. The influence of transfer of peculiar geometrical deviations of honing heads on the machined surface is defined.

microrelief, macrorelief, grid of traces, geometric grooving lines, honing head, grain motion trajectory

К.К. Щербина, канд. техн. наук, **А.И. Гречка**, доц., канд. техн. наук, **В.А. Мажара**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Дяченко**, асист.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Кинематика процесса резания при хонинговании отверстий со сменной геометрией расположения брусков

В статье рассматривается процесс образования кинематики образования сетки следов с учетом влияния на микро рельеф образованной поверхности. Приведены схемы взаимодействия обработанной поверхности с алмазно-абразивными брусками, которые размещены под разными углами и их влияние на образование микро рельефа обрабатываемого отверстия. Представлена расчетная схема расположения алмазно-абразивных брусков под разными углами на основании, которой получены математические модели плотности образованной сетки следов. Также представлено исследование влияния угла наклона алмазно-абразивных брусков на образование макро рельефа обрабатываемого отверстия. Определено влияние переноса собственных геометрических отклонений хонинговальных головок на обрабатываемую поверхность.

микро рельеф, макро рельеф сетка следов, геометрические производные линии, упруго-винтовой хон, траектория движения зерна

Problem statement. Increasing requirements for the functional parameters of control equipment in hydraulic machines that are used in agricultural machinery and deals with the performance of its elements has necessitated improving quality of surfaces and accuracy of their dimensions. Finish machining is used to comply with the specified requirements, including the process of honing holes. In addition to indicators of accuracy of the sizes and quality of a surface, requirements on wear resistance of the processed holes and productivity of processing are put forward. These indicators are influenced by the kinematics of cutting process. One of the main indicators of the stages of the cutting process kinematics is the formation of microrelief of the machined surface (method of forming a grid of traces).

Analysis of recent research and publications. The analysis of studies of cutting process kinematics indicates that honing of holes by traditional methods will occur on the principle of trace [1, 2, 3]. It implies absence of transfer of geometric deviation of the contour

wear of the specified stick on the geometric grooving lines (GGL) of the machined hole [1].

There is a coincidence of the directional of the processed hole with the contour of the diamond stick of traditional hone, and the interaction between them is linear, which leads to copying geometric deviations or wear of the contour of the specified stick [1, 2].

Problem definition. Based on this analysis, it is necessary to ensure formation of microrelief of the machined surface, particularly the formation of the grid of traces with the maximum step density. Also, it is essential to consider control of wear of a diamond-abrasive stick and copying geometrical deviations on the machined surface.

Main material. To solve this problem, we consider a ball-wedge hone [4, 5] with variable geometry of diamond-abrasive sticks (Fig. 1). Let us consider the scheme of formation of microrelief of the machined surface. (Fig. 2).

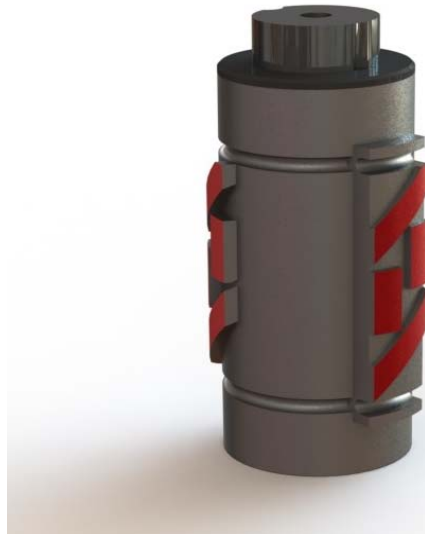
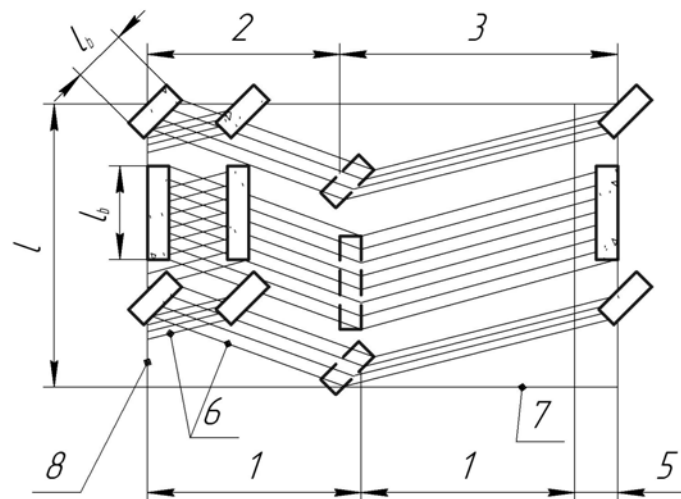


Figure 1 – Ball-wedge hone with variable stick geometry

Source: developed by the authors



1 – distance of one rotational motion; 2 – distance of progressive motion; 3 – distance of reverse motion; 4 – distance of reciprocal motion; 5 – additional route of the head rotation at the end of the double motion; 6 – trajectory of some grains; 7 – geometric grooving line in the form of a generant; 8 – geometric grooving line in the form of a directional; l_b – stick length.

Figure 2 – The scheme of formation of a microrelief of the machined surface

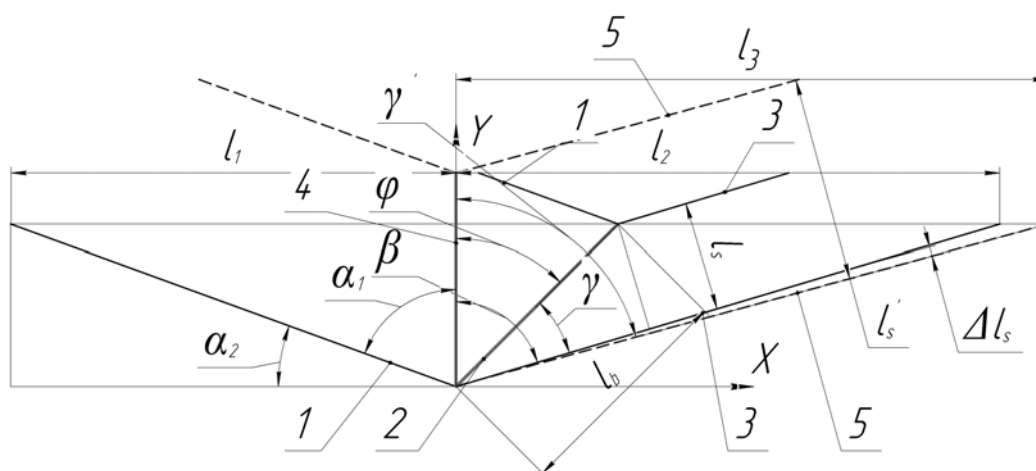
Source: developed by the authors

Based on the scheme shown in Figure 2 it is seen that the extreme sticks, which are located at the angle of 45° with the generant of the machined hole have a point nature of interaction, which provides only the local value of geometric deviation or contour wear of the stick. That is, for all diamond-abrasive sticks, the formation of geometric grooving line, namely the generating one, when honing the hole will occur on the principle of trace.

The directional of the machined hole for the sticks located at the angle of 45° will have a point nature of interaction with a contour, that is only local value of transfer of errors will be present. Accordingly, for the specified sticks, the formation of a geometric grooving line, namely the directional, while honing the hole will occur on the principle of trace, which will reduce negative impact of the sticks located at the angle of 90° , which perform processing on the principle of copying.

Conformation of necessary microrelief or microgeometry is due to the interaction of the trajectory of some grains that move along given vectors of linear velocities. This determines the degree of density of the points of intersection of the trajectory of some grains. In Figure 2 the scheme characterizes different steps of the grid of traces of diamond-abrasive grains, which remains after the sticks located at different angles. That is, the density of the grid will be higher than with a uniform placement of diamond-abrasive sticks.

To determine density of the grid of traces, which remains after diamond-abrasive sticks located at different angles, we construct the calculation scheme (Fig. 3).



- 1 – trajectory of grain motion during progressive motion; 2 – diamond-abrasive stick with 45° angle; 3 – trajectory of grain motion during reverse motion of the stick with 45° angle; 3 – diamond-abrasive stick with 90° angle; 3 – trajectory of grain motion during reverse motion of the stick with 90° angle; l_b – length of the stick (step of the grid of traces at progressive motion); l_1 – distance covered during progressive motion; l_2 – distance covered during reverse motion; l_s – step of the grid of traces during reverse motion of the stick with 45° angle; l'_s – step of the grid of traces during reverse motion of the stick with 90° angle; Δl_s – difference of the steps of the sticks with different angles; α_1 – the angle of grain trajectory relative to the Y axis during progressive motion; α_2 – the angle of grain relative to the X axis during progressive motion; β – the angle of the grain relative to the Y axis during reverse motion; φ – the angle of inclination of the diamond-abrasive stick; γ – the angle of grain trajectory relative to the diamond-abrasive stick with 45° angle during reverse motion; γ – the angle of grain trajectory relative to the diamond-abrasive stick with 90° angle during reverse motion.

Figure 3 – Calculation scheme of microrelief formation of the machined surface

Source: developed by the authors

Based on the above calculation scheme 3, the density of the grid of traces while honing with diamond-abrasive sticks positioned at 90° angle will be characterized by the angle of intersection of velocities of rotational and reciprocal motion and is determined by the formula:

$$l_s'' = l_b \cdot \sin \left(90 - 0.5 \arctg \frac{v_p}{v_o} \right) \pi l_1, \quad (1)$$

where l_b – is length of the stick (step of the grid of traces during progressive motion);

v_p – is the velocity of reciprocal motion;

v_o – is the velocity of rotation motion;

In its turn, the density of the grid of traces for diamond-abrasive sticks positioned at 45° angle will be determined by the following formula [1]:

$$l_s = l_b \cdot \sin \left(\frac{l_2 \cdot 180}{\sin \left(90 - 0.5 \arctg \frac{v_p}{v_o} \right) \cdot \pi l_1} - \varphi \right), \quad (2)$$

where γ – is the angle of the grain trajectory relative to the diamond-abrasive stick during reverse motion.

l_2 – distance covered during reverse motion;

l_s – step of the grid of traces during reverse motion;

l_1 – distance covered during progressive motion;

φ – inclination angle of the diamond-abrasive stick.

Therefore, density of the grid of traces at different angles of diamond-abrasive sticks, according to the calculation scheme, will be characterized by the difference of the density of the grid of traces of the sticks positioned at the angles of 90° and 45°. And it is characterized by the following equation:

$$\Delta l_s = l_s'' - l_s. \quad (3)$$

In the obtained equation (3) we substitute the values of the densities of the grid of traces of the sticks positioned at the angle of 90° (1) and the angle of 45° (2):

$$\Delta l_s = l_b \left[\sin \left(90 - 0.5 \arctg \frac{v_p}{v_o} \right) \pi l_1 - \sin \left(\frac{l_2 \cdot 180}{\sin \left(90 - 0.5 \arctg \frac{v_p}{v_o} \right) \cdot \pi l_1} - \varphi \right) \right], \quad (4)$$

The obtained mathematical model allows determining the density of the grid of traces at the position of central sticks at the angle of 90° and for the extreme sticks at the angle of 45°. The position of the sticks at the angles of 90° and 45° are optimal to ensure the formation of macrorelief of the machined hole.

Therefore, when combining the angle of inclination of diamond-abrasive sticks it was possible to increase the density of the formed microrelief and, thus, increase the processing productivity and reduce the effect of wear on the geometry of the machined hole.

Conclusions. As a result of the study, it was determined that the formation of microrelief with positioning diamond-abrasive sticks with variable geometry, namely with different angles of inclination, allows increasing the density (grid of traces) of intersection points, which reduces the roughness of the treated surface.

In the process of formation of the macrorelief of the machined surface the position of diamond-abrasive sticks allowed carrying out processing on the principle of the trace that allowed reducing transfer of deviations from a honing head to the machined surface in the course of their wear.

Список літератури

1. Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Кінематика процесу різання при хонінгуванні отворів пружно-гвинтовим хонем. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2015. Вип. 28. С. 80 -86.
2. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. Изд. 2-е доп. и перераб. Москва: Машиностроение, 1970. 407 с.
3. Щербина К.К., Григорян Н.В. Кінематика процесу різання при хонінгуванні отворів пружно-гвинтовим хонем. *Проблеми енергозбереження і механізації в гірничо-металургійному комплексі: тези доповідей Міжн. наук.-техн. конф. молодих вчених і студентів*. Кривий Ріг: ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2018. С. 38 – 42.
4. Щербина К.К., Шарікова А.О. Параметричний синтез кульково-клинового хону. *Актуальні задачі сучасних технологій: тези доповідей Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів*. Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. С. 252-253.
5. Кульково-клиновий хон: пат. 105089 України: МПК B23D77/04, B24B33/00. № u201506333; заявл. 26.06.2015; опубл. 10.03.2016. Бюл. №5.

References

1. Pidhaiets'kyj, M.M. & Shcherbyna, K.K. (2015). Kinematyka protsesu rizannia pry khoninhuvanni otvoriv pruzhno-hvyntovym khonom [Kinematics of cutting holes in honing spiral spring hone]. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. Kirovohr. nats. tekhn. un-tu. – Collection of Scientific Works of KNTU. Engineering in agricultural production, industrial engineering, automatio, Vol. 28, 80 -86 [in Ukrainian]*.
2. Fedotenok, A.A. (1970). *The kinematic structure of metal-cutting machine tools*. (2 d ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Shcherbyna, K.K. & Hryhorian, N.V (2018). Kinematyka protsesu rizannia pry khoninhuvanni otvoriv pruzhno-hvyntovym khonom. [Kinematics of cutting holes in honing spiral spring hone]. *Problems of energy saving and mechanization in the mining and metallurgical complex: Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia molodykh vchenykh i studentiv – International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students*. Kryvyi Rih: DVNZ «Kryvorizkyi natsionalnyi universytet» [in Ukrainian].
4. Shcherbyna, K.K. & Sharikova, A.O.(2015) Parametrychnyi syntez kulkovo-klynovoho khonu [Parametrical synthesis roller wedge honing head]. *Actual problems of modern technologies: Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia molodykh vchenykh i studentiv – International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students*. Ternopil: TNTU im. Ivana Puliuia [in Ukrainian].
5. Pat. 105089 of Ukraine, MPK B23D77/04, B24B33/00 (2016). Kul'kovo-klynovykhon [Ball-wedge hone]. No. u201506333; stated. June 26, 2015; has been published March 10, 2016, Bul. No.5 [in Ukrainian].

К.К.Щербина, канд. техн. наук, **А.І. Гречка**, доц., канд. техн. наук, **В.А. Мажара**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Дяченко**, асист.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Кінематика процесу різання при хонінгуванні отворів хонем зі змінною геометрією розташування брусків

На сучасному етапі розвитку сільськогосподарського машинобудування важливим питанням є підвищення ефективності і швидкодії керуючої апаратури гідравлічного приводу, який набув широко розповсюдження у сільськогосподарській техніці. Для швидкої роботи керуючої апаратури забезпечую підвищена точність та якість виготовлення її елементів. Особлива увага приділяється операціям фінішної обробки, серед яких хонінгування прецизійних отворів.

Одним з головних факторів, котрий впливає на точність та якість оброблюваного отвору є процес утворення макрогеометрії та мікрогеометрії. На якість мікрорельєфу впливає кінематика утворення сітки слідів. На утворення макрогеометрії в свою чергу впливає принцип утворення геометричних виробних ліній з врахування копіювання існуючих відхилень та переносу зносу алмазно-абразивних брусків. Для проведення дослідження побудовано схеми взаємодії обробленої поверхні з алмазно-абразивними брусками, котрі розміщені під різними кутами та їх вплив на утворення мікрорельєфу оброблюваного отвору. Представлена розрахункова схема розташування алмазно-абразивних брусків під різними кутами, на підставі якої отримані математичні моделі густини утвореної сітки слідів. Також представлено

дослідження впливу кута нахилу алмазно-абразивних брусків на утворення макрорельєфу оброблюваного отвору.

В результаті проведених досліджень визначено, що при утворенні мікрорельєфу розміщення алмазно-абразивних брусків зі змінною геометрією, а саме з різним кутом нахилу, дає змогу збільшити густину (сітки слідів) точок перетину, що забезпечує зниження шорсткості оброблюваної поверхні. В процесі утворення макрорельєфу оброблюваної поверхні розміщення алмазно-абразивних брусків дозволило виконувати обробку за принципом сліду, що дозволило зменшити перенос відхилень від хонінгувальної головки до оброблюваної поверхні в процесі їх зносу.

мікрорельєф, макрорельєф, сітка слідів, геометричні виробні лінії, хонінгувальна головка, траєкторія руху зерна

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 677.11.021

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.164-172>

А.Ю. Лисих, канд. техн. наук

Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Первомайськ Миколаївської області, Україна

e-mail: snezanad256@gmail.com

С.М. Коб'яков, доц., канд. с.-г. наук

ДВНЗ Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон, Україна

e-mail: kobyakovsm@gmail.com

Аналіз інноваційних технологій механічної переробки текстильної сировини

Стаття присвячена новітнім технологіям переробки коноплі з метою одержання луба. Запропоновано технологічну схему виділення лубу конопель, спроектовано і виготовлено окремі частини обладнання, які включають такі процеси як: м'яття з одночасним скоблінням, тіпання з прочісуванням та трясіння з вібрацією.

Процес м'яття зі скоблінням здійснюється у м'яльно-скоблячій експериментальній частині. Конструктивні та технологічні параметри м'яльної частини зроблені так, що забезпечують поступове збільшення інтенсивності процесу м'яття. Процес поєднання вібраційних і трясильних дій на матеріал одночасно виконують голки гребеневого поля та планки голчатого транспортера, де шар матеріалу періодично підкидається в вертикальній площині.

Використання процесів тіпання з чесанням та трясіння з вібрацією в технології одержання лубу конопель у декілька переходів дозволяють одержувати луб за вмістом костриці та його масо-довжині у широкому діапазоні. Таке поєднання процесів трясіння та вібрації забезпечує збільшення ефективності знекостричення лубу.

луб конопель, процес м'яття, скобління, тіпально-чесальні дії, трясильно-вібраційні дії

А.Ю. Лысих, канд. техн. наук

Первомайский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Первомайск Николаевской области, Украина

С.М. Кобяков, доц., канд. с.-х. наук

ГВУЗ Херсонский государственный аграрно-экономический университет, г. Херсон, Украина

Анализ инновационных технологий механической переработки текстильного сырья

Статья посвящена новым технологиям переработки конопли с целью получения луба. Предложено технологическую схему выделения луба конопли, спроектировано и изготовлено отдельные части оборудования, которые включают такие процессы как: промин с одновременным скоблением, трепание с прочесыванием и трясением с вибрацией.

Процесс промина со скоблением осуществляется в мяльно-скобящей экспериментальной части. Конструктивные и технологические параметры мяльной части сделаны так, что обеспечивают постепенное увеличение интенсивности процесса промина. Процесс объединения вибрационных и трясильных действий на материал одновременно выполняют иглы гребенного поля и планки игольчатого транспортера, где слой материала периодически подбрасывается в вертикальной плоскости.

Применение процессов трепания с прочесыванием и трясения с вибрацией в технологии получения луба конопли в несколько переходов позволяют получать луб с содержанием костры и его массо-длинной в широком диапазоне. Такое сочетание процессов трясения и вибрации обеспечивает увеличение эффективности обескостривания луба.

луб конопли, процесс мятья, скобление, трепально-чесальные действия, трясильно-вибрационные действия

Постановка проблеми. Відомо, що технологія збирання та первинної переробки конопель, яка спрямована на одержання насіння, довгого та короткого волокна не відповідає сучасним вимогам по ряду чинників, до яких відносяться:

- велика трудомісткість та енергоємність процесів збирання та приготування моченцевої трести конопель, що у сучасних умовах є економічно недоцільним;
- складність отримання високоякісної рошенцевої трести конопель тому, що збирання конопель та приготування трести відбувається у вересні місяці, коли погодні умови несприятливі для проходження цього процесу;
- використання спеціальної техніки при збиранні конопель та приготуванні рошенцевої трести, яка забезпечує паралельність стебел при збиранні та їх щільність, на одиницю площі при розстиланні стебел в стрічку, внаслідок чого вона має низьку продуктивність, що безумовно негативно впливає на собівартість продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останній час багато вчених проводили дослідження в напрямку механічної переробки текстильної сировини, а саме луб'яних культур. Дослідження в основному стосувалися питань пов'язаних як з удосконаленням існуючих способів механічної переробки так і з пропозицією застосування інших технічних рішень переробки. Наукові дослідження проводились у декількох напрямках.

В сучасних економічних умовах з'явилась об'єктивна необхідність створення нових технологій збирання конопель, які спрямовані на ресурсозбереження, де з'являється можливість використовувати потужні адаптовані машини загального сільськогосподарського призначення: зернозбиральні комбайни, жниварки, рулонні преси та іншу техніку, котра забезпечує комплексну механізацію збиральних процесів. В зв'язку з цим виникає гостра проблема переробки конопляної сировини – соломи, яка залишається після збирання насіннєвої частини і в своїй масі складається з хаотично розташованих стебел. Рішення цього питання можливо на основі виділення зі стебел конопель лубу без розподілу останнього на довгий та короткий, тобто в вигляді однотипного матеріалу. Відповідно до обраної стратегії переробки соломи конопель, тобто виділення лубу механічним способом, для цього можуть бути використані механічні дії, які використовуються у первинній переробці стебел трести. А саме механічним способом здійснюється розділення стебла на луб'яну та деревинну частини. Для цього використовують процеси м'яття, тіпання та трясіння, але ці дії призначені для виділення волокна зі стебел трести конопель, де зв'язок між волокном і деревиною послаблений в процесах її приготування. Тому для виділення лубу зі стебел соломи конопель необхідно задіяти ще і інші механічні дії які були б спрямовані на підвищення

інтенсивності очищення лубу від деревини та інших не волокнистих частин. Виділення лубу без розподілу на довгій та короткий дає можливість спростити технологічний процес, а саме зменшити кількість одиниць технологічного обладнання, знизити його метало- й енергоємність та комплексно механізувати процеси починаючи від збирання до механічної переробки.

Постановка завдання. Виходячи з вище вказаного, та аналізу відомих технічних рішень виділення лубу зі стебел луб'яних культур механічним способом запропоновано наступний технологічний ланцюжок, який включає такі процеси: шароформування, м'яття з одночасним скоблінням, тіпання з одночасним чесанням, трясіння з одночасною вібрацією (рис. 1).

В процесі тіпання з одночасним чесанням відбувається очищення лубу від костриці і подальше порушення зв'язку між лубом та деревиною. Це здійснюється під дією бил та гребенів барабану і під барабанною декою. Так била барабану здійснюють тіпання сирцю, гребені барабану розчісують сирець і орієнтують подрібнену деревину відносно бил, матеріал протягуючись барабаном по колосникової решітці звільнюється від костриці.

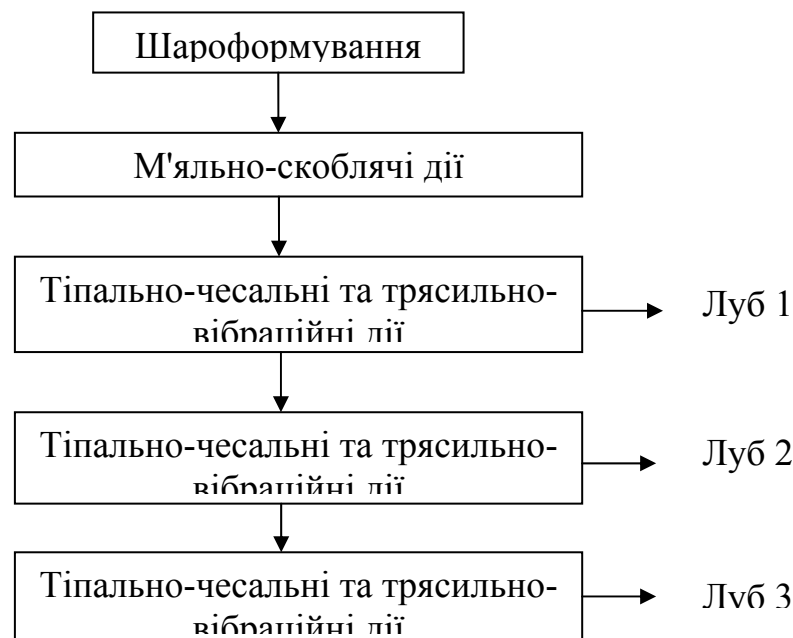


Рисунок 1 – Схема виділення лубу конопель

Джерело: [6]

Завершальним етапом обробки лубу в першому переході є очищення його від вільної костриці, що залишилася від попередніх процесів. Виділення вільної костриці з лубу (костриці, що втратила попередній зв'язок лубом і знаходиться в загальній масі) відбувається під час операцій трясіння та вібрації.

Поєднання тіпально-чесальних та трясильно-вібраційних дій в наведеної схемі виділення лубу конопель у декілька переходів забезпечує поступове підвищення ступеня очищення лубу і дозволяє одержувати луб із заданими параметрами за довжиною та вмісту в ньому костриці в залежності від напрямків подальшого його використання [1, 10].

Порушення зв'язку між лубом і деревиною м'яльно-скоблячими діями сприяє зниженню вмісту залишкової костриці у лубі під час подальших операцій, де очищення лубу здійснюється високошвидкісними діями бил тіпально-чесальних барабанів та інтенсивними діями трясіння в поєднанні з вібрацією.

Принципова технологічна схема агрегату для виділення лубу конопель представлена на рис. 2. Згідно із цією схемою стебла із рулону живильним транспортером (1) подаються у шароформуючу, м'яльно-скоблячу частину (2), потім матеріал поступає у тіпально-чесальну частину (3) і, насамкінець, у трясильно-вібраційну частину (4). На цьому закінчується перший перехід виділення лубу конопель. Другий і третій переходи являють собою чергування тіпально-чесальної (5, 7) та трясильно-вібраційної частин (6, 8) з тією різницею, що інтенсивність дій на матеріал поступово збільшується.

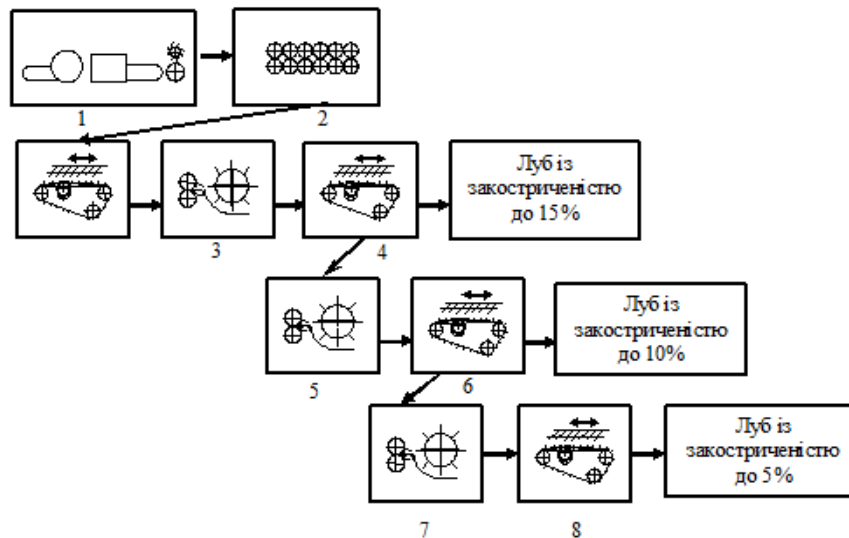


Рисунок 2 – Принципова технологічна схема агрегату для виділення лубу конопель

Джерело: [6]

Сутність запропонованої технології полягає у тому, що шляхом застосування відомих механічних дій на стебла конопель, поєднаних із новими, більш інтенсивними діями дає можливість ефективно виділити луб з різним вмістом костриці [2].

Виклад основного матеріалу. Згідно із запропонованою технологічною схемою виділення лубу конопель, спроектовано і виготовлено окремі частини до експериментального обладнання, яке включає основні процеси: м'яття з одночасним скоблінням, тіпання з прочісування, трясіння з вібрацією.

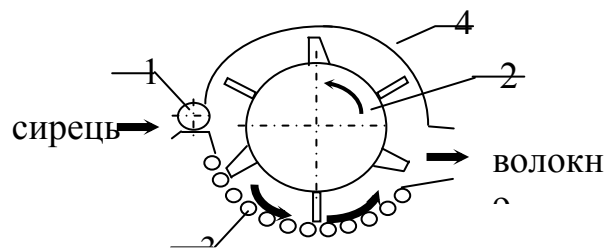
Процес м'яття зі скоблінням здійснюється у м'яльно-скоблячій експериментальній частині. М'яльна частина складається із шести пар м'яльних вальців, які мають різний крок і заходження рифлів, та однієї пари гладких вальців, рами і привода. Конструктивні та технологічні параметри м'яльної частини зроблені так, що забезпечують поступове збільшення інтенсивності процесу м'яття. Процес руйнування зв'язку між лубом і деревиною здійснюється м'яльними вальцями планчатого типу. Диференціація дії вальців на стебла забезпечується за рахунок зміни швидкості обертання вальців та кроку рифлів при постійній інтерсекції.

Привід м'яльних вальців дозволяє підвищувати швидкість обертання вальців по ходу матеріалу від (1 і 2) до (5 і 6) пари, за рахунок чого відбувається утворення

витаючого поля, яке забезпечує потоншення шару матеріалу, сковзання стебел відносно рифлів вальців, тим самим підвищується інтенсивність порушення зв'язку між лубом і деревиною та видалення вільної костриці.

Процес тіпання здійснюється на тіпально-чесальній частині (рис. 3). В конструкції тіпально-чесального барабана запропоновано чергування тіпальних бил із гребінчастими пластинами, що поєднає дії тіпання та прочісування матеріалу. Зменшення відстані між гребінчастими пластинами в другому і третьому переходах веде до збільшення інтенсивності процесу тіпання по переходах.

Тіпально-чесальна частина складається із живильного вальця 1 (рис. 3), тіпально-чесального барабана 2 і деки 3. Тіпально-чесальний барабан складається із трьох бил із набором гребінчастих трапецієподібних пластин для прочісування сирцю. Дека виготовлена у формі колосникової решітки.



1 – живильний валець; 2 – тіпально-чесальний барабан; 3 – дека; 4 – кожух

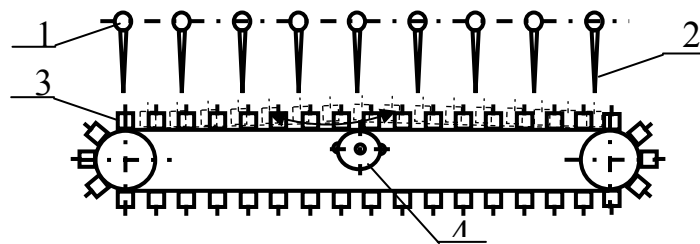
Рисунок 3 – Технологічна схема тіпально-чесальної частини стану

Джерело: [6]

У дослідному станді використано трясильну машину із верхнім гребневим полем [3], яка була модернізована, а саме доповнена вібраційним вузлом, що дозволило об'єднати процеси трясіння і вібрації.

Трясильно-вібраційна частина складається із дев'яти голчатих валів 1 (рис. 4), на кожному із яких закріплено по 21 голці 2 довжиною 220 мм, голчастого транспортера 3 і вузла вібрації 4. Кут розмаху голок регулюється від 70° до 100° , швидкість руху матеріалу змінюється від 8 до 14 м/хв, а частота коливань голок від 120 до 290 кол/хв.

Голчатий транспортер складається із двох прогумованих ременів, на яких закріплені дерев'яні планки із голками.



1 – голчаті вали; 2 – голки; 3 – голчатий транспортер; 4 – вузол вібрації

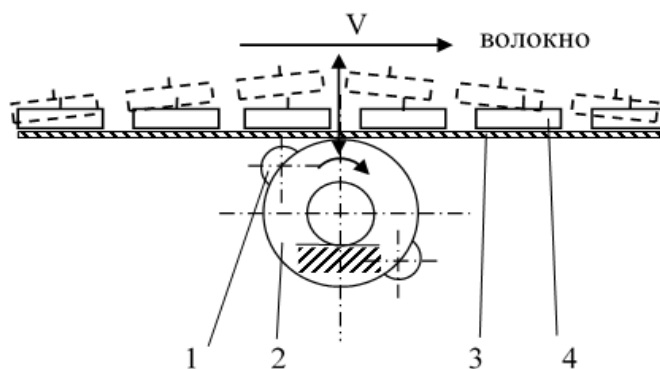
Рисунок 4 – Технологічна схема трясильно-вібраційної частини

Джерело: [9]

Поєднання вібраційних і трясильних дій на матеріал одночасно діють голки гребневого поля та планки голчатого транспортера, які переміщують матеріал у горизонтальному напрямку та шар матеріалу періодично підкидається в вертикальній

площині. Таке поєднання процесів трясіння та вібрації забезпечує збільшення ефективності знекостричення лубу [4, 9].

Для більш детального вивчення даного процесу було спроектовано та виготовлено вузол вібрації, в конструкції якого є можливість зміни частоти дії бійка на верхню гілку транспортера. Вузол вібрації складається із валу, на якому кріпляться два ударні механізми, котрі у свою чергу складаються із двох щік (2) і набору роликів (1) (рис. 5).



1 – ролик; 2 – щока; 3 – прогумований ремінь; 4 – голчастий транспортер

Рисунок 5 – Технологічна схема вузла вібрації

Джерело: [5]

Для дослідів використовували солому конопель сорту ЮСО-31. Після обмолоту конопель у полі формували партії сировини зі стебел різного діаметра і довжини, що дозволило отримати солому із різними морфологічними і фізико-механічними властивостями. Якість соломи, отриманий луб у процесі досліджень оцінювали згідно методик [5, 6]. Необхідну кількість повторювань у дослідях визначали, виходячи із заданої помилки, яка не перевищує 5%.

На початку досліджень процесу виділення лубу були поставлені однофакторні та багатофакторні експерименти, а ефективність процесу виділення лубу визначали за показниками його виходу і вмісту костриці [7, 8].

Аналіз одержаних результатів з розробки технології одержання однотипного лубу конопель.

Вплив швидкісних режимів роботи м'яльної частини на обробку соломи конопель визначали наступним чином. Обробку стебел конопель на експериментальній м'яльній частині проводили за чотирма режимами роботи (n_1 - n_4) (табл. 1), незмінними факторами були: діаметр вальців та глибина заходження рифлів 10 мм.

Таблиця 1 – Частота обертання м'яльних вальців

Пари вальців	$n_1, \text{хв}^{-1}$	$n_2, \text{хв}^{-1}$	$n_3, \text{хв}^{-1}$	$n_4, \text{хв}^{-1}$
1-2	75	110	170	230
3-4	125	190	290	370
5-6	300	450	700	950

Джерело: розроблено авторами на підставі [6]

У досліді визначали відсоток умину за формулою:

$$Y = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

де m_1 – маса соломи, кг;

m_2 – маса пром'ятої соломи, кг.

Аналіз отриманих даних свідчить, що відсоток умину із зростанням частоти обертання м'яльних вальців для всіх фракцій стебел зменшується. Це пояснюється тим, що зі збільшенням частоти обертання вальців час перебування матеріалу в зоні обробки зменшується і вільна костриця не встигає висипатись. Для крупностеблової соломи зі збільшенням частоти обертання м'яльних вальців від n_1 до n_2 спостерігається істотне зниження відсотка умину з 39,6 до 37,1%.

Одержані результати показують, що зі збільшенням частоти обертання тіпального барабана, наприклад, для крупностеблової фракції з 267 до 450 хв⁻¹ відбувається суттєве зменшення вмісту костриці з 20±0,6% до 10±1,0%. Подальше її збільшення до 577 хв⁻¹ навпаки веде до збільшення закостриченості до 27±0,4%. Аналогічна тенденція спостерігається і для інших фракцій сировини, тобто ми маємо зону оптимуму для всіх фракцій сировини яка розташована в діапазоні від 350 до 450 хв⁻¹ обертання тіпального барабана.

Процесу трясіння піддавали сирець, отриманий на м'яльній машині ПМГ-1 із трьох фракцій соломи конопель: крупностеблової, середностеблової і дрібностеблової, при щільності завантаження голчатого транспортеру 500 г/мп.

Швидкість голчатого транспортера трясильного вузла становила 8-14 м/хв при постійній частоті коливань 200 хв⁻¹ і куті розмаху голок голчатих гребенів 70°. Після проходження сировини крізь трясильне поле визначали вихід лубу і вміст у ньому костриці. Одержані результати показують, що зі збільшенням швидкості руху транспортера від 8 до 14 м/хв зменшується час перебування сировини у зоні трясіння, це призводить до зменшення кількості впливів на оброблюваний луб і відповідно до збільшення його закостриченості.

Висновки. Одержані експериментальні дані показують, що запропонований процес виділення лубу конопель, який складається із чергування декількох основних процесів: м'яття рифленими вальцями планчатого типу із перепадом швидкостей між парами вальців, тіпання з одночасним скоблінням, трясіння у поєднанні з вібрацією, – забезпечує отримання лубу за вмістом костриці та масо-довжини у широкому діапазоні, при цьому вміст костриці в отриманому лубі може коливатися у межах від 0,8 до 13%, а масо-довжина – від 500 до 900 мм, в залежності від того, яка кількість переходів буде залучена для переробки соломи конопель. У технологічній схемі закладена можливість відключення як другого, так і третього переходу для отримання лубу з необхідними технологічними параметрами. Теоретично та експериментально обґрунтовано одержання однотипного лубу конопель з використанням високоефективних, глибоко диференційованих механічних дій на матеріал, а саме, поєднання механічних процесів м'яття з сковзанням, тіпання з чесанням та трясіння з вібрацією.

Використання процесів тіпання з чесанням та трясіння з вібрацією в технології одержання лубу конопель у декілька переходів дозволяють одержувати луб за вмістом костриці та його масо-довжині у широкому діапазоні – від 0,8 до 13% та від 500 до 900 мм відповідно.

Запропонована інноваційна технологія одержання однотипного лубу конопель дозволяє комплексно використовувати коноплі, тобто одержувати насіння та волокнисту продукцію і завдяки цьому підвищити рентабельність цієї технічної культури.

Список літератури

1. Спосіб виділення однотипного лубу зі стебел насіннєвих конопель: пат. 55242 Україна: МПК D 01 B 1/10. № 3. №2002086503; заявл. 05.08.2002; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
2. Гілязетдінов Р.Н., Коропченко С.П., Москаленко Б.І. Нові процеси у виділенні волокна луб'яних культур *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2010. № 94. С. 184-188.
3. Коропченко С.П., Губанов А.Б. Новые воздействия в процессе трясения *Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины*. 2001. № 5. С. 38-40.
4. Коропченко С.П., Гілязетдінов Р.Н., Головій О.В. Вплив вібраційних та трясильних дій робочих органів на знекострічення лубу конопель *Вісник Черкаського інституту агропромислового виробництва: міжвід. темат. зб. наук*. 2002. Вип. 3. С. 100-103.
5. Коропченко С.П. Розробка технологічного процесу виділення лубу конопель : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01. / Херсон. нац. техн. ун-т. Херсон, 2007. 137 с.
6. Гілязетдінов Р.Н. Розвиток наукових основ створення інноваційних технологій первинної переробки луб'яних культур : дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.01. / Херсон. нац. техн. ун-т. Херсон, 2009. 329 с.
7. Москаленко Б.І., Гілязетдінов Р.Н. Дослідження стійкості до зламу стебел конопель *Луб'яні та технічні культури*. 2011. Вип. 1 (6) С. 150-154.
8. Коропченко С.П., Гілязетдінов Р.Н., Мешков Ю.Є. Отримання лубу конопель із заданими параметрами зі стебел із різними фізико-механічними властивостями *Легка промисловість*. 2006. № 1. С. 46-47.
9. Коропченко С.П., Гілязетдінов Р.Н., Мешков Ю.Є. Вплив вібраційних дій в процесі трясіння на знекострічення лубу конопель *Легка промисловість*. 2008. № 3 С. 51-52.
10. Коропченко С.П., Гілязетдінов Р.Н., Лук'яненко П.В. Шляхи удосконалення технології збирання та переробки насіннєвих конопель *Легка промисловість*. 2006. № 2. С. 46-47.

References

1. Pat. 55242 of Ukraine, MPK D01 B1/10 (2005). Sposib vydilennia odnotipnoho lubu zi stebel nasinnievikh konopel [Method for isolation of the same type bast from hemp stem]]. No. 2002086503; stated. August 05, 2002; has been published June 15, 2005, Bul. No.6 [in Ukrainian].
2. Hiliazetdinov, R.N., Koropchenko, S.P., & Moskalenko B.I. (2010). Novi protsesy u vydilenni volokna lubianykh kultur [New processes in the extraction of bast crops]. *Mekhanizatsia ta elektrifikatsia silskoho hospodarstva. – Mechanization and electrification of agriculture*, 94, 184-188 [in Ukrainian].
3. Koropchenko, S.P., & Hubanov A.B. (2001). Novye vozdeistviia v protsesse triasenia [New shaking effects]. *Problemy lerkoi i tekstylnoi promyshlennosti Ukrainy – Problems of light and textile industry of Ukraine*, 5, 38-40 [in Ukrainian].
4. Koropchenko, S.P., Hiliazetdinov, R.N., & Holovii O.V. (2002). Vplyv vibratsiinykh ta triasylnykh dii robochykh orhaniv na znekostrychennia lubu konopel [Effect of vibrational and shaking actions of working bodies on hemp bast bleaching]. *Visnyk Cherkaskoho instytutu ahropromyslovoho vyrobnetstva – Bulletin of Cherkasy Institute of Agro-Industrial Production*, 3, 100-103 [in Ukrainian].
5. Koropchenko, S.P. (2007). Rozrobka tekhnolochnoho protsesy vidilennia lubu konopel [Processing of hemp bast extraction process]. *Candidate's thesis*. Kheson [in Ukrainian].
6. Hiliazetdinov, R.N. (2009). Rozvytok naukovikh osnov stvorennia innovatsiinykh tekhnolohii pervynnoi pererobky lubianykh kultur [Development of scientific branches of bast crops primary processing]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kheson [in Ukrainian].
7. Moskalenko B.I., & Hiliazetdinov, R.N. (2011). Doslidzhennia stiikosti do zlamu stebel konopel [Study of resistance to breakage of hemp stalks]. *Lubiani ta tekhnichni kultury – Bast and technical crops*, 1, 6, 150-154 [in Ukrainian].
8. Koropchenko, S.P., Hiliazetdinov, R.N., & Mieshkov, Yu.Ye. (2006). Otrymannia lubu konopel iz zadanyimi fiziko-mekhanichnymy vlastyvostiamy [Production of hemp bast with specified parameters from stalks with different physical and mechanical properties]. *Lehka promyslovist – Light industry*, 1, 46-47 [in Ukrainian].
9. Koropchenko, S.P., Hiliazetdinov, R.N., & Mieshkov Yu.Ye. (2008). Vplyv vibratsiinykh dii v protsesi triasinnia na znekostrychennia lubu konopel [Effect of vibration actions during shaking on hemp bast desiccation]. *Lehka promyslovist – Light industry*, 3, 51-52 [in Ukrainian].
10. Koropchenko, S.P., Hiliazetdinov, R.N., & Lukianenko P.V. (2006). Shliakhy udoskonalennia tekhnolohii zbyrannia ta pererobki nasinnievkykh konopel [Ways to improve the collection and processing of hemp seeds]. *Lehka promyslovist – Light industry*, 2, 46-47 [in Ukrainian].

Alla Lisikh, PhD. tech. sci.

Pervomaysk branch of the Mykolaiv university of shipbuilding of the name of admiral Makarov, Pervomaysk, Ukraine

Sergey Kobyakov, Assoc. Prof., PhD agric. sci.

Kherson State Agrarian-Economic University, Kherson, Ukraine

Analysis of Innovative Technologies for Mechanical Processing of Textile Raw Materials

Article is devoted to developed and implemented new technical solutions for the processing of hemp stems in order to obtain bast. This article presents the rationale for new approaches in solving the problem of obtaining a cannabis club for various purposes, depending on the sharpness indicator. The stiffness indicator is manageable by changing the number of technological transitions that include processing mechanisms.

The article analyzes new technical solutions as a result of which a technological scheme for isolating hemp bast is proposed. Using the proposed technological scheme for the extraction of hemp bast, individual parts of the equipment were designed and manufactured, which include such processes as: scraping with simultaneous scraping, scuttle with combing and shaking with vibration. The process of scraping with scraping is carried out in the scraping and scraping experimental section. The design and technological parameters of the bead part are made in such a way that they provide a gradual increase in the intensity of the bead process.

The process of combining vibrating and shaking actions on the material at the same time is performed by the needles of the combed field and the strips of the needle conveyor, where a layer of material is periodically thrown in a vertical plane. The use of scuttle processes with combing and shaking with vibration in the technology of obtaining hemp bast in several passes allows you to obtain a bast with a fire content and its mass-length in a wide range. This combination of shaking and vibration processes provides an increase in the efficiency of de-sharpening the bast.

The experimental data obtained show that the proposed process of isolating hemp bast, consisting of the alternation of several main processes: crushing with grooved slat-type rollers with a speed difference between pairs of rollers, scuttling with simultaneous scraping, shaking in combination with vibration, provides a bast with a content of fire and mass-long in a wide range, while the content of the fire in the resulting bast may fluctuate, depending on how many transitions will be used to process hemp straw.

hemp bast, crushing process, scraping, beating-carding actions, shaking-vibration actions

Одержано (Received) 16.11.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.664

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.173-181>

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук,
Т.В. Руденко, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*

e-mail: krasotamv@ukr.net

Дослідження розподілення електричного струму при відновленні автомобільних деталей контактним наварюванням

В статті розглянуті причини нерівномірності густини електричного поля при контактному наварюванні компактних (дріт, стрічка) та порошкових матеріалів при відновленні деталей автомобілів. Нерівномірність густини струму визначає нерівномірне розподілення температурного поля в зоні утворення литого ядра і впливає на якість наварених покриттів. При контактному наварюванні компактних матеріалів відбувається недогрівання центральної зони ядра, що спричиняється дією геометричного, температурного і магнітоелектричного чинників. При наварюванні порошкових матеріалів густина електричного поля вища в центральних зонах, що обумовлюється більш високим ступенем ущільнення порошкового матеріалу в цій зоні. При наварюванні порошкового матеріалу центральна зона нагрівається до більш високих температур ніж граничні зони. Неоднорідні електричні поля при контактному наварюванні розглянутих матеріалів приводять до зниження функціональних властивостей покриттів.

контактне наварювання, роликовий електрод, лінії струму, порошковий матеріал, покриття

Ю.В. Кулешков, проф., д-р. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Исследование распределения электрического тока при восстановлении автомобильных деталей контактной наваркой

В статье рассмотрены причины неравномерности плотности электрического поля при контактном наваривании компактных (проволока, лента) и порошковых материалов при восстановлении деталей автомобилей. Неравномерность плотности тока определяет неравномерное распределения температурного поля в зоне образования литого ядра и влияет на качество наваренных покрытий. При контактном наваривании компактных материалов происходит недогрев центральной зоны ядра, что вызывается действием геометрического, температурного и магнитоэлектрического факторов. При наваривании порошковых материалов плотность электрического поля выше в центральных зонах, что обуславливается более высокой степенью уплотнения порошкового материала в этой зоне. При наваривании порошкового материала центральная зона нагревается до более высоких температур, чем граничные зоны. Неоднородные электрические поля при контактной наварке рассмотренных материалов приводят к снижению функциональных свойств покрытий.

контактная наварка, роликовый электрод, линии тока, порошковый материал, покрытие

Постановка проблеми. Контактне наварювання є одним з найбільш продуктивних і економічних способів нанесення покриттів при відновленні автомобільних деталей.

При відновленні деталей методами контактного наварювання використовують, в основному, два типи матеріалів – компактні (дроти, стрічки) та порошкові матеріали.

При контактному наварюванні процес утворення покриття відбувається в результаті нагрівання до пластичного стану деталі та матеріалу, що наварюється.

На теперішній час наварювання покриттів з компактних та порошкових матеріалів, що відрізняється високою продуктивністю і забезпечує стабільну якість з'єднань, застосовується в автомобільному, а також сільськогосподарському машинобудуванні та інших галузях при відновленні та зміцненні деталей.

Якість наварювання покриттів забезпечується виконанням повного технологічного циклу, що складається з окремих операцій: попереднього стискання матеріалу електродами машини, нагріванням матеріалу та деталі з утворенням литої зони, і охолодження з'єднання після наварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесах деформації і рекристалізації можливо виділити інкубаційний період, що характеризується лінійним зростанням зерна [1]. Починаючи з деякої температури спостерігається утворення осередків, що інтенсифікують процес рекристалізації. При цьому пластичність металів знаходиться в складній залежності від температури процесу. В результаті нерівномірного нагрівання литої зони і деформації її при стискуванні електродами можливе утворення тріщин і надривів [1, 2]. Б. Ф. Якушин [3] показав, що такі тріщини виникають при швидкості деформації в температурному інтервалі ламкості, який більший деякого граничного «темпу» деформації.

При контактному наварюванні покриттів з компактних матеріалів частина зусилля, прикладеного до електроду, витрачається на деформацію дроту чи стрічки в зоні наварювання. Тому, при виборі режиму наварювання покриттів з компактних матеріалів необхідно враховувати властивості матеріалів деталей та покриттів [4-6].

Режим наварювання характеризується величиною струму, тиском між електродами, розміром і формою контактної поверхні електродів, при цьому струм і тиск є функцією часу [6, 7].

Як зазначає Б. Д. Орлов, [1], міра нагрівання поверхні при наварюванні лише побічно пов'язана з температурою плавлення в середині зварювального контакту. Цей зв'язок порушується, наприклад, при забрудненні поверхні деталі. Після припинення імпульсу зварювального струму відбувається кристалізація розплавленого металу. Характер кристалізації визначається теплопередачею в електроди і зварювані деталі. Метал ядра знаходиться під впливом розтягуючих напружень, що виникають і що розвиваються в зварній точці внаслідок усаджування шва. Усаджування металу може викликати дефекти ядра: пори, тріщини [1, 2]. Ущільнення металу в ядрі забезпечується проковуванням. У дослідженнях [1, 2] встановлено, що при контактному наварюванні покриттів з компактних матеріалів із збільшенням зусилля стискування електродів знижується вірогідність появи тріщин в зварній точці.

Постановка завдання. Мета виконаних досліджень полягає у встановленні закономірностей розподілу електричного струму в зоні утворення одиначної зварювальної точки при контактному наварюванні порошкових та компактних матеріалів при відновленні автомобільних деталей.

Викладення основного матеріалу. При наварюванні покриттів з компактних матеріалів за рахунок притискання їх електродами відбувається контакт на границі деталей-покриття окремими мікроступами на поверхні матеріалу. При недотриманні режимів наварювання може спостерігатися їх розплавлення при проходженні електричного струму, що приводить до виплесків і порушення процесу наварювання.

Після ввімкнення зварювального струму відбувається пластична деформація литої зони зварювальної точки. Внаслідок нерівномірного нагрівання металу біля міжелектродної області утворюється зона з різним ступенем рекристалізації.

Якість покриття, отриманого контактним наварюванням, визначається статичною міцністю зчеплення покриття та деталі, яка залежить від розмірів литого ядра точки. У зв'язку з відсутністю обґрунтованих розрахунків розмірів литого ядра, з точки зору здобуття оптимальної міцності з'єднання, вибір параметрів проводиться на підставі емпіричних формул, пов'язаних з товщиною покриттів.

Виникнення тріщин в зварному ядрі визначається співвідношенням трьох характеристик: температурного інтервалу крихкості, пластичності металу в цьому інтервалі і темпу наростання пружно-пластичних деформацій по мірі зниження температури [1, 2]. В залежності від форми, розмірів і жорсткості з'єднання, а також від режимів і технології наварювання покриттів деформація металу до кінця процесу кристалізації може бути меншою, рівною або більшою мінімальної пластичності металу. У останніх двох випадках утворення гарячих тріщин неминуче. Наявність внутрішніх макродефектів в литому ядрі зварної точки вуглецевої сталі має небажаний ефект. В результаті інтенсивного тепловідведення в електроди покритті відбувається загартування ядра точки. Мала пластичність ядра підсилює дію макродефектів, які можуть бути центрами розповсюдження тріщин внаслідок температурних змін і механічних навантажень.

При контактному наварюванні покриттів з компактних матеріалів на вуглецеві сталі в металі спостерігаються фазові і структурні зміни, розвиваються місцеві пластичні деформації і напруження. Властивості навареного покриття залежать від умов нагрівання і охолодження. Швидкість охолодження зварної точки може досягати значних величин $(0,6 \dots 12,5) \cdot 10^3$ К/с [63]. Висока швидкість кристалізації приводить до утворення стовпчастих кристалів, що знижують механічні властивості металу [5]. Схема кристалізації має істотний вплив на концентрацію деформації в металі шва і температурному інтервалі ламкості, на пластичність і хімічну неоднорідність зварного з'єднання.

Параметри режиму, які визначають кінцеву структуру в зоні наварювання покриттів з компактних матеріалів зазвичай встановлюються шляхом підбору в процесі досліджень.

При проходженні в компактному матеріалі змінного струму спостерігається явище *поверхневого ефекту* [1, 2], що приводить до зміни густини струму від периферії до центру поперечного перетину провідника (рис. 1). Ця зміна тим більша, чим вище частота струму і більший діаметр провідника. Зміна густини струму була визначена в [1] за наступним співвідношенням:

$$i_r = i_{r1} \cdot e^{-r/\Delta}, \quad (1)$$

де i_r – густина струму в точці r , А/м²;

i_{r1} – густина струму на поверхні провідника, А/м²;

r – координата точки, м;

Δ – відстань від поверхні дроту у напрямку до його центру, на якому густина убуває в $e=2,71$ раз в порівнянні з густиною струму на поверхні, м:

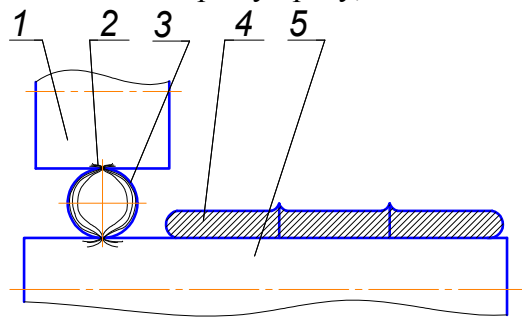
де $\omega = 2\pi f$;

f – частота струму, Гц;

μ – магнітна проникність матеріалу дроту;

β_0 – магнітна постійна ($\beta_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

g – питома електропровідність матеріалу дроту, $\text{Om}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.



1 – електрод-ролик; 2 – умовні лінії струму; 3 – дріт; 4 покриття; 5 – деталь (вал).

Рисунок 1 – Розподіл ліній струму при наварюванні дроту

Джерело: розробка автора

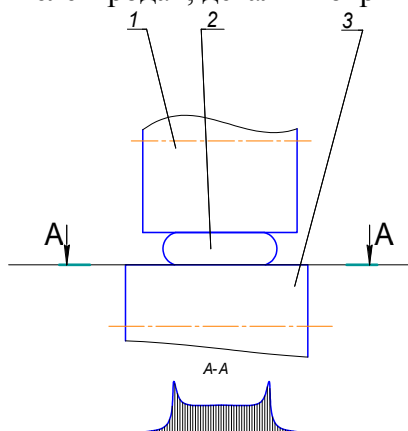
При збільшенні товщини покриття спостерігається криволінійна залежність зміни електричного потенціалу. Таким чином, при нанесенні покриттів зростаюча неоднорідність електричного поля – одна з причин отримання шарів з нерівномірними фізико-механічними властивостями. При цьому, концентрація дефектів в покриттях (пори, окисні включення і т.д.) відбуватиметься в зонах, де густина струму найменша, тобто безпосередньо в місцях викривлення ліній струму.

Характер тепловиділення при контактному наварюванні компактних матеріалів визначається електричним полем в зварюваних деталях і електродах.

Електричне поле – сукупність потенціалів або густини струму в різних точках зварюваних деталей в різні моменти часу. Для наварювання покриттів з компактних матеріалів характерне нерівномірне електричне поле, що пов'язане з дією геометричного, температурного і магнітоелектричного чинників.

Геометричний чинник обумовлений тим, що розміри електричних контактів, як правило, набагато менші розмірів поверхні деталі та покриття. Ілюстрацією впливу геометричного чинника служать характер електричного поля в рівномірно нагрітих деталях при точковому наварюванні покриттів з компактних матеріалів (рис. 2) [4].

Поле густини струму залежить від абсолютних значень потенціалів і електричних опорів компактного матеріалу, деталі, на яку наварюється покриття, і електродів. Найбільша густина струму (рис. 2) досягається поблизу границь контактів в результаті розтікання струму в електродах, деталі і покритті.



1 – електрод-ролик; 2 – дріт; 3 – деталь.

Рисунок 2 – Розподіл густини струму в перерізі

Джерело: розробка автора

Характер поля залежить також від геометричних розмірів електроду, розташування в ньому охолоджувального каналу.

Температурний чинник проявляється в обтіканні струмом більш нагрітих ділянок з'єднання, що відрізняються підвищеним опором, в умовах нерівномірного температурного поля і поля електричних опорів.

Густина струму поблизу границь ядра помітно підвищується (до 25 % і більше) і знижується в середині ядра.

Метал сьгає пластичного стану через деякий час з початку імпульсу. Ядро виникає в області контакту деталь-покриття, де досягається найбільша густина струму і у меншій мірі позначається теплообмін з електродами. Температура в контактї електрод-деталь досягає максимального значення до кінця імпульсу і складає в середньому 400...500 °С (для сталей) і підвищується із зростанням темпу наварювання покриттів з компактних матеріалів.

При нанесенні покриттів контактним наварюванням *порошкових* матеріалів характер розподілення густини струму значно відрізняється від наварювання компактних.

Процес контактного наварювання порошкових матеріалів характеризується використанням електричного струму силою 15...30 кА, вторинною напругою 1...6 В, тиском до 100 МПа. Спостерігається висока швидкість нагрівання покриття. За даними роботи [6-8], швидкість нагрівання при наварюванні порошкових матеріалів при густині струму 0,9...1,2 кА/мм² перевищує 50000 К/с.

Контактне наварювання передбачає отримання покриттів в твердій фазі, оскільки в цьому випадку гарантується збереження в покритті основних функціональних властивостей, притаманних вихідній порошковій системі (збереження спадкової структури).

Проте, застосування даного методу обмежене через відсутність систематичних випробувань і рекомендацій по розробці технологічних процесів і їх дослідженню. Це, перш за все, відноситься до досліджень процесів ущільнення і нагрівання порошкових шарів, а також до методики вибору оптимальних технологічних параметрів наварювання.

При контактному наварюванні порошків також має місце неоднорідність електричного потенціалу, що створює градієнт температури в зоні наварювання покриття [7].

Нагрівання порошкового матеріалу, так як і компактного, визначається одночасно протікаючими процесами виділення тепла (за законом Джоуля-Ленца) і його поширення (теплопередачею).

Однак, якщо розглядати загальну картину тепловиділення не в суцільній масі металу, а в міжчастинкових контактах металевого порошку і в безпосередній близькості від них, то необхідно мати на увазі ряд самостійних і незалежних один від одного осередків тепловиділення [7, 8]: у зоні контакту, де відбувається викривлення ліній електричного струму; за рахунок електричного опору мікроставів, безпосередньо створюючих контакт; у природних окисних плівках; теплота Пельтьє (для випадку використання постійного електричного струму) по межах контакту плівок та металу деталі або по межах різнорідних металів.

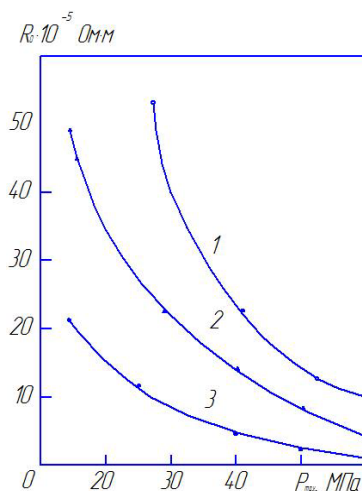
Електричний опір порошкового шару при контактному наварюванні – величина змінна, залежна в загальному випадку від температури і тиску процесу. Із зростанням температури пластична деформація частинок порошкового матеріалу приводить до збільшення їх контактних поверхонь, руйнування поверхневих плівок і зниження пористості порошкового шару.

Враховуючи незначний час нагрівання (0,02...0,04 с), що характеризується тривалістю пропускання імпульсів електричного струму, можна передбачити, що стабільність тепловиділення в порошковому шарі задаватиметься початковим електроопором. Цей легкоконтрольований параметр характеризує термонавантаження наварювання, визначаючи максимальне значення струму.

При здійсненні процесу наварювання якісне покриття (у якому відсутні ділянки проплавлення, пори і т. д.) досягається лише в тому випадку, якщо шар порошкової шихти має низький і стабільний по перетину початковий електроопір і гарну ущільнюваність при малому тиску пресування (40...70 МПа).

Використання порошкових матеріалів з високим питомим електроопором приводить до зниження електропровідності порошкового шару, дестабілізації процесу наварювання порошку, що виявляється в утворенні локальних зон нагрівання і виплеску частини металу у вигляді крапель. В результаті цього явища спостерігається зниження міцності зчеплення наварених покриттів. Покриття формується неоднорідним, з великою кількістю дефектів. Різко збільшується зношування електродів, що відбувається, в основному, за рахунок ерозійного руйнування робочої поверхні і налипання на неї розплавленого металу.

На формування початкового електричного опору великий вплив має величина тиску порошку. Початковий електроопір для металевих порошків змінюється обернено-пропорційно зміні тиску в порошковому матеріалі (рис. 3).



: 1 – ПЖ1; 2 – ПГ С1-ПГ-С1+50% ФХ-800

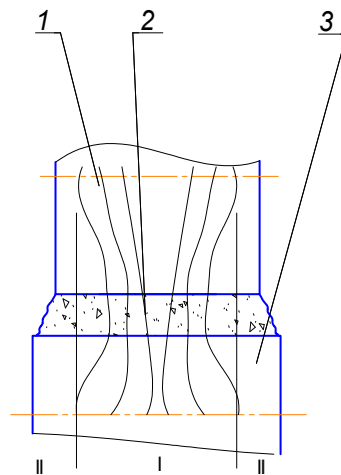
Рисунок 3 – Залежність початкового електричного опору порошкового шару від тиску в порошку для різних матеріалів

Джерело: [7]

В дослідженнях особливостей формування початкового електричного опору при контактному наварюванні порошку [10] було встановлено, що розподіл питомого електричного опору ρ_0 носить характер пропорційний епюрі нормального тиску. Залежність зміни електричного опору узгоджується з даними про зміну щільності порошку при його спресовуванні [10 - 12], що свідчить про превалюючий вплив щільності на електричну провідність порошкового шару.

Отже, в поперечному перерізі шару (у площині, перпендикулярній напрямку наварювання роликом) (рис. 4) можна виділити дві області I – центральна та II – периферійна). Ущільнення порошку відбувається в області I при його прокатуванні

електродом-роликом. У зонах II практично ущільнення не відбувається. Така зонна будова контактної області викликає відмінність в нагріванні порошкового шару по його ширині. Утворюються відповідно три ділянки: центральна I і дві граничних II.



1 – електрод-ролик; 2 – дріт; 3 – деталь; I – центральна зона; II – гранична зона

Рисунок 4 – Схема ущільнення (а) в поперечному перерізі покриття

Джерело: розробка автора

В центральній зоні порошок має максимальну щільність і мінімальний електроопір, що обумовлює проходження через нього електричного струму (струму наварювання). У граничних областях II поверхня деталі і порошковий шар нагріваються за рахунок теплопередачі від зони I. Міцність зчеплення і твердість шару тут знижуються, відмічається низька щільність і велика кількість окисних плівок. Ці ділянки при функціонуванні покриття можуть викришуватися.

Наварене покриття в зонах II характеризується пористістю 20...30%, при цьому розмір пор коливається від 1 до 100 мкм. На границях між частками порошку повністю зникають окисні плівки. В зоні I наварювання, внаслідок дії тиску з боку ролика, порошковий шар ущільнюється, внаслідок чого стабілізується його електричний опір і інтенсифікується процес нагрівання. Відбувається формування основних функціональних властивостей покриття – міцності зчеплення, зносостійкості.

Питомий електроопір порошкового шару зменшується із зростанням температури. Це пояснюється збільшенням пластичної деформації часток порошкової шихти, що приводить до збільшення площі їх контактних поверхонь, руйнування поверхневих плівок при нагріванні, зниженні пористості порошкового шару. При досягненні температур (0,4...0,8) $T_{пл}$ електричним опором шихти є активний опір матеріалу порошку, а опір міжчасткових контактів незначний.

Подальше нагрівання приводить до деякого зростання електроопору шихти, що пояснюється збільшенням електроопору металу покриття при його нагріві.

При здійсненні процесу контактного наварювання металевих порошків якісні покриття можливо отримати лише у випадку, якщо шар порошкової шихти має низький і стабільний електроопір по перерізу і гарну ущільненість при малих тисках пресування, що застосовуються при наварюванні (40...70 МПа).

Таким чином, враховуючи високу швидкість нагрівання і малу тривалість проходження електричного струму через металевий порошок, можливо зробити висновок, що стабільність тепловиділення в порошковому шарі буде в значному

ступеню визначатися величиною початкового електроопору. Цей параметр характеризує термонавантаженість контактного наварювання і визначає максимальне значення струму наварювання.

Висновки. При контактному наварюванні компактних (дріт, стрічка) та порошкових матеріалів має місце неоднорідність густини електричного поля, що визначає нерівномірне розподілення температурного поля в зоні утворення литого ядра і впливає на якість наварених покриттів. При контактному наварюванні компактних матеріалів відбувається недогрівання центральної зони ядра, що спричиняється дією геометричного, температурного і магнітоелектричного чинників.

На основі встановленого зв'язку між параметрами процесу можливо зробити висновок, що неоднорідність електричного поля при контактному наварюванні порошкових матеріалів та нерівномірне нагрівання порошкових матеріалів і дефекти покриттів, до яких воно приводить, пов'язане з особливостями ущільнення порошку. Внаслідок згущення ліній електричного струму в центральній зоні спостерігається локальне підвищення температури. Крім того, пори являються діелектричною фазою і збільшують електроопір на периферійних ділянках. Підвищувати якість покриттів, які отримуються контактним наварюванням можливо, забезпечуючи якісне ущільнення порошкового матеріалу по всьому перерізу покриття.

Список літератури

1. Технология и оборудование контактной сварки: учебник для машиностроительных вузов / Б.Д. Орлов, А.А. Чакалев, Ю.В. Дмитриев и др.; Под общ. ред. Б.Д. Орлова. М: Машиностроение, 1986. 352 с.
2. Кочергин К.А. Контактная сварка. Л: Машиностроение, 1987. 240 с.
3. Якушин Б.Ф. Современное состояние проблемы горячих трещин в сварных соединениях // 1-й Симпозиум «Трещины в сварных соединениях сталей», ЧССР, 13-17 апреля 1981 г. / Доклады МВТУ. Москва. М.: МВТУ им. Баумана, 1981. С. 22-36.
4. Слиозберг С.К. Электроды для контактной сварки. Л.: Машиностроение, 1972. 96 с.
5. Амелин Д.В., Рыморов Е.В. Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин электроконтактной наваркой. М: Агропромиздат, 1987. 157 с.
6. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. Минск: Наука и техника, 1975. 152 с.
7. Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А. Электроконтактное упрочнение. Минск: Наука и техника, 1982. 256 с.
8. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Ярошевич В.К. Импульсные методы нанесения покрытий. Минск: Наука и техника, 1985. 279 с.
9. Клименко Ю.В. Электроконтактная наплавка. М: Металлургия, 1978. 125 с.
10. Дослідження впливу параметрів циліндричних електродів на формування покриттів при контактному наварюванні порошків. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Красота. М.В., А.М. Артюхов, І.В., Шепеленко І.В., Дубовик В.О. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.*. Кіровоград, КНТУ, 2010. Вип. 40. С. 179-185.
11. Лопата Л.А., Красота М.В. Расчет температурных полей при нанесении покрытий способом электроконтактного припекания на наружные цилиндрические поверхности деталей. *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць ХДПУ*. Харків, 2000. Вип. 1. С. 172-176.
12. Черновол М.И., Лопата Л.А., Красота М.В. Совершенствование технологии восстановления детали типа «вал» электроконтактным припеканием металлических порошков. *Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов* / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. Мн.: Технопринт, ПГУ. 2001. 736. С. 300-303.

References

1. Orlov, B.D., Chakalev, A.A., Dmitriev, Ju.V & et. al. (1986). *Resistance welding technology and equipment*. B.D. Orlova (Ed.). Moskow: Mashinostroenie [Russian].
2. Kochergin, K.A. (1987). *Kontaktnaja svarka [Contact welding]*. L: Mashinostroenie [Russian].

3. Jakushin, B.F. (1981). Sovremennoe sostojanie problemy gorjachih treshhin v svarnyh soedinenijah [Current state of the problem of hot cracks in welded joints] . 1-j Simpozium «Treshhiny v svarnyh soedinenijah stalej», ChSSR, 13-17 aprelja 1981 g. Moskva: MVTU im. Baumana, pp. 22-36. [Russian].
4. Sliozberg, C.K. (1972). *Jelektrody dlja kontaktnoj svarki [Resistance welding electrodes]*. L.: Mashinostroenie [Russian].
5. Amelin, D.V. & Rymorov, E.V. (1987). *Novye sposoby vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin jelektrokontaktnoj navarkoj [New methods of restoration and hardening of machine parts by electrical contact welding]*. Moskow: Agropromizdat [Russian].
6. Dorozhkin, N.N. (1975). Uprochnenie i vosstanovlenie detalej mashin metallicheskim poroshkami [Strengthening and restoration of machine parts with metal powders]. Minsk: Nauka i tehnika [Russian].
7. Jaroshevich, V.K., Genkin, Ja.S. & Vereshhagin, V.A. (1982). *Jelektrokontaktnoe uprochnenie [Electrical contact hardening]*. Minsk: Nauka i tehnika [Russian].
8. Dorozhkin, N.N., Abramovich, T.M. & Jaroshevich, V.K. (1985). *Impul'snye metody nanesenija pokritij [Impulse coating methods]*. Minsk: Nauka i tehnika [Russian].
9. Klimenko, Ju.V. (1978). *Jelektrokontaktnaja naplavka [Electrocontact surfacing]*. Moskow: Metallurgija, [Russian].
10. Krasota, M.V., Artiukhov, A.M., Shepelenko, I.V. & Dubovyk, V.O. (2010). Doslidzhennia vplyvu parametriv tsylindrychnykh elektrodiv na formuvannia pokryttiv pry kontaktnomu navariuvanni poroshkiv [Probe of influence of parametres of cylindrical electrodes on formation of coverings at contact welding of powders]. *Konstruvannja, vyrobnytvo ta ekspluatacija sil'skohospodars'kix mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 40, 1*, 179-185. [in Ukrainian].
11. Lopata, L.A. & Krasota, M.V. (2000). Raschet temperaturnykh polej pry nanesenij pokrytyj sposobom elektrokontaktnoho prypekanyia na naruzhnye tsylindrycheskie poverkhnosti detalej [Calculation of temperature fields when applying coatings by electrocontact sintering on the outer cylindrical surfaces of parts]. *Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats' KhDPU – High technologies in mechanical engineering: coll. Science. against the KhDPU, Vol. 1.*, 172-176 [Russian].
12. Chernovol, M.I., Lopata, L.A. & Krasota, M.V. (2001). Sovershenstvovanie tehnologii vosstanovlenija detali tipa «val» jelektrokontaktnym pripekanjem metallicheskih poroshkov [Improvement of the technology of restoration of a part of the "shaft" type by electrocontact sintering of metal powders]. *Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy uprochnenija i vosstanovlenija izdelij mashinostroenija: Sb. nauchn. trudov – Theoretical and technological foundations of hardening and restoration of mechanical engineering products: Sat. scientific. works* (S.A. Astapchika, P.A. Vitjazja Eds.), 736, 300-303. [Russian].

Yuriy Kuleshkov, Prof., DSci., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Ruslan Osin**, . Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Researching of Dynamic Electricity Distribution Along with the Renovation of Automobile Details by the Contact Covering Welding

The goal of completed research is determination of common factors of dynamic electricity distribution in the area of simple welding spot forming due to contact welding-on compact and powdered materials.

Due to contact welding-on of compact (rod, belt) and powdered materials there is the dissimilarity of an electric field, which determines the unequal distribution of temperature field in the area of the moulded core creating and influence on the welded on covering quality. By the contact welding-on of compact materials, there is an occurrence of central core zone unheating, which is coming as a result of geometrical, temperature and magnetic-electric factors.

During contact welding of metal powders, considering high speed of heating and a small-time of dynamic electricity passage through powder, it is possible to make a conclusion, that the stability of heat generation in a powder surface will be determined by starting electricity resistance value. High-quality plating can be reached if the powder charge will have low and stable electricity resistance in a cross-section and good compactness under the condition of low compress pressure, which is used for welding. (40 ... 70 MPa).

Electrical field dissimilarity with contact welding-on powdered materials leads to unequal heating of powdered materials and covering defects, which is taking place due to the features of powder compression. As a result of current lines concoction in the central area is observed at a local temperature increase. Besides, interstices are dielectrical phase and increase electrical resistance in the peripheral areas. To increase the quality of coverings, got by contact welding-on is able due to providing high-quality powder material compression on the whole covering cut.

contact welding-on, electrode wheel, current lines, powdered material, covering

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 631.539.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.182-188>

В.И. Цапу, доц., канд. техн. наук, **В.Ф. Горобець**, доц., канд. техн. наук
Государственный Аграрный Университет Молдовы, г. Кишинев, Молдова
e-mail: v.tapu@uasm.md

Износостойкость сопряжений с зазором, восстановленных полиамидоэпоксидными пористыми покрытиями

В статье представлены результаты исследования износостойкости сопряжений с зазором, восстановленных путем нанесения пористого полимерного композиционного материала на одну из составляющих пару трения деталь. Установлено, что полученные нами пористые полимерные композиционные покрытия позволяют уменьшить износ по сравнению с композиционными покрытиями без пор в 1,64 раза.

износ, покрытие, износостойкость, смазывающие материалы

В.І. Цапу, доц., канд. техн. наук, зав. кафедри, **В.Ф. Горобець**, доц., канд. техн. наук, декан
Державний Аграрний Університет Молдови, м. Кишинів, Молдова

Зносостійкість спржень з зазором, що відновлені поліамідоепоксидними пористими покриттями

У статті представлені результати дослідження зносостійкості спржень з зазором, відновлених шляхом нанесення пористого полімерного композиційного матеріалу на одну із деталей, що складають пару тертя. Встановлено, що отримані нами пористі полімерні композиційні покриття дозволяють зменшити знос в порівнянні з композиційними покриттями без пор в 1,64 рази.

знос, покриття, зносостійкість, мастильні матеріали

Постановка проблемы. Использование полимерных материалов в качестве покрытий для восстановления изношенных деталей машин нашло применение в ремонтном производстве. Однако более широкое их использование сдерживается из-за плохой прочности сцепления, усадки, старения, низкой смачивающей способности и других свойств полимерных материалов.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Авторами [1, 2] предложены состав полимерной композиции и способ нанесения полимерной полиамидоэпоксидной композиции, позволяющие получать прочно сцепленные с металлической подложкой покрытия. Для улучшения физико-механических свойств полиамида П12 авторы работ [3] предлагают добавлять в состав композиции различные вещества, которые способствуют снижению усадки, старения, повышения износостойкости.

Постановка задачи. В данной работе предлагается повысить маслосъемность поверхностных слоев полимерных композиционных покрытий за счет введения в состав композиции 5...10% поваренной соли (NaCl). Полученные пористые покрытия, после растворения соли из поверхностных слоев, в дальнейшем подвергли испытаниям на износ при различных условиях смазки.

Изложение основного материала. Методика. Выбор материалов для компенсации износа деталей машин, используемых при различных условиях смазки и эксплуатации, выполнили в ходе лабораторных исследований пар трения.

При испытании на износ использовали сопряжение типа вал–втулка. Пористые композиционные полимерные покрытия были нанесены на поверхность вала (ролика). Контртело (втулка) было изготовлено из стали 35. Покрытия на ролик были нанесены в два этапа. На первом этапе был нанесен слой полиамидэпоксидной композиции следующего состава: 45% эпоксидного олигомера и остальное полиамид П12. Этот слой предназначен для получения прочного сцепления с подложкой из стали. Второй слой следующего состава: дисульфид молибдена – 4...5%, измельченные волокна стекловолокна – 10...14%, эпоксидный олигомер – 25...30%, поваренная соль (NaCl) – 5...10% и остальное полиамид П12. В последующем соль из поверхностных слоев полимерного покрытия была удалена путем растворения по определенной методике.

Испытания на износ проводили на машине трения СМЦ 3 с использованием следующих условий: скорость ролика – $V_p=0,63$ м/с; давление в зоне сопряжения – $P=1,5$ МПа.

Для выявления преимуществ полученных пористых покрытий мы провели исследования при сухом трении и со смазкой. В качестве смазки использовали воду и Литол 24.

Внутренняя поверхность втулки была обработана под размер $\varnothing 40H9$ и имела шероховатость $R_a=6,3$ мкм. Поверхность ролика с покрытием была обработана под размер $\varnothing 40e8$ и имела шероховатость $R_a=12,5$ мкм.

Во всех испытаниях производили притирку сопрягаемых поверхностей до получения максимального размера пятна контакта.

Определение величины износа проводили путем микрометрирования сопрягаемых деталей с использованием цифровых приборов. Замеры проводили после каждых 24 часа испытаний.

Результаты и обсуждения. Полученные результаты износных испытаний представлены на рисунках 1, 2 и 3. Достоверность полученных данных подтверждается тем, что испытания при каждом режиме повторяли 5-тикратно, а полученные результаты были обработаны известными статистическими методами.

Характер эволюции износа полимерной композиции и структура поверхностного слоя в зависимости от условий смазки представлены на рис. 1. Представленные кривые на рис. 1 описываются уравнениями регрессии (1, 2 и 3).

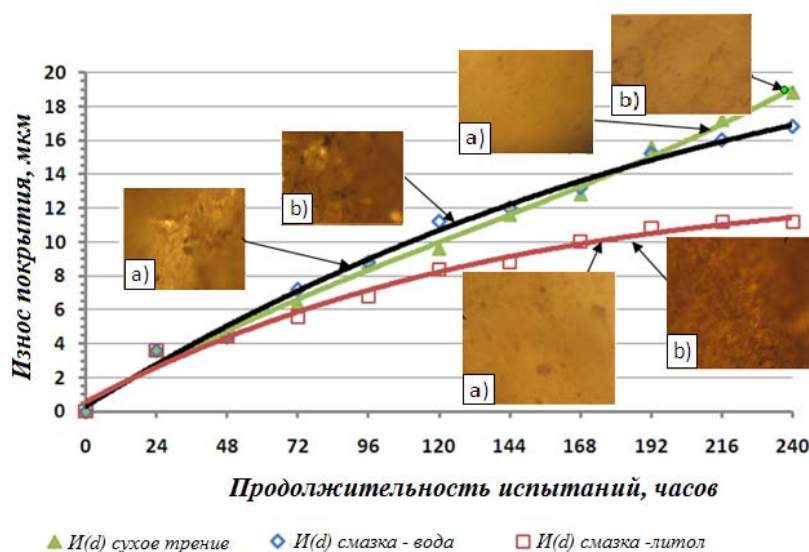
$$I(d)_{\text{б.с.}} = -0,0009x^3 - 0,0587x^2 + 2,5542x - 2,1394, R^2 = 0,9957; \quad (1)$$

$$I(d)_{\text{вода}} = 0,0096x^3 - 0,1828x^2 + 2,7773x - 2,1818, R^2 = 0,9939; \quad (2)$$

$$I(d)_{\text{Литол}} = 0,004x^3 - 0,1604x^2 + 2,4841x - 1,7515, R^2 = 0,9859. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что интенсивность износа композиционного материала при различных условиях смазки различна, так по истечении 240 часов испытаний износ при трении без смазки составил $18,8 \pm 2$ мкм, при использовании воды – $16,8 \pm 2$ мкм, а при использовании смазки ЛИТОЛ 24 – 10 ± 1 мкм. Таким образом, показана важность, которую имеет смазка для пористой полимерной композиции.

Уменьшение интенсивности износа пористой полимерной композиции при использовании в качестве смазки Литола 24 можно объяснить тем, что обеспечен положительный градиент межфазного сопротивления молекулярных связей поверхностных слоев. Истирание последних, как правило, не абразивно, а фрикционно и проявляется в отрыве разной конфигурации частиц с поверхностного слоя.



Условия испытаний: втулка – Сталь 30 в условиях поставки, нагрузка 1,5 МПа, скорость в сопряжении $v_r = 0,63 \text{ мс}^{-1}$; начальная шероховатость – покрытия $Ra = 12,5 \text{ мкм}$; отверстие втулки $Ra = 6,3 \text{ мкм}$. Структура поверхностного слоя: а) – после притирки; б) – в конце испытаний

Рисунок 1 – Динамика износа полимерного композиционного покрытия нанесенного на вал при различных условиях смазки

Источник: разработано авторами

Можно также предположить, что полученный положительный результат обеспечен и тем фактом, что смазка находится в зоне трения более продолжительное время за счет того, что удерживается в искусственно образованных порах в поверхностном слое покрытия.

Динамика износа металлического контртела представлена на рис 2. Полученные кривые износа описаны уравнениями (4–6), которые практически аналогичны с теми, что были получены для пористой полимерной композиции

$$I(D)_{\text{б.с.}} = -0.008x^3 + 0.1497x^2 + 0.6728x - 0.7697, R^2 = 0.998; \quad (4)$$

$$I(D)_{\text{вода}} = -0.0013x^3 - 0.0238x^2 + 1.7897x - 1.8848, R^2 = 0.9939; \quad (5)$$

$$I(D)_{\text{литол}} = 0.0049x^3 - 0.1021x^2 + 1.7294x - 1.5818, R^2 = 0.9994; \quad (6)$$

И в данном случае видно, что присутствие в зоне трения смазки снижает интенсивность износа металлического контртела. В тех случаях, когда не было смазки или была вода, интенсивность износа металлического контртела была выше и практически имела одинаковый характер. Так, после 240 часов испытаний были получены следующие результаты: при трении без смазки $I_{\text{б.с.}} = 14 \pm 1 \text{ мкм}$; трение в присутствии проточной воды $I_{\text{вода}} = 13 \pm 1 \text{ мкм}$; трение при использовании Литол 24, $I = 9 \pm 1 \text{ мкм}$.

Исходя из полученных результатов можно констатировать, что для пары трения скольжения металл – пористый полимерный композит, виды смазки влияют на интенсивность их износа. Необходимо отметить, что в течении первых ста часов испытаний характер эволюции износа пары трения при различных типах смазки практически одинаков и имеет тенденцию плавного увеличения. Такой характер износа можно объяснить тем, что происходит перенос композиционного материала на металлическое контртело.

После удаления этого слоя с металлического контртела, процесс его износа разный и зависит от типа смазывающего материала. Металлические контртела практически не меняют характер износа при использовании в качестве смазки воды, а также при трении без смазки, зато при использовании смазки ЛИТОЛ 24 интенсивность изнашивания значительно меньше.

Долговечность пар трения в значительной мере зависит от величины зазора. На рис. 3 представлена эволюция зазора в исследуемых парах трения в зависимости от типа смазывающего материала.

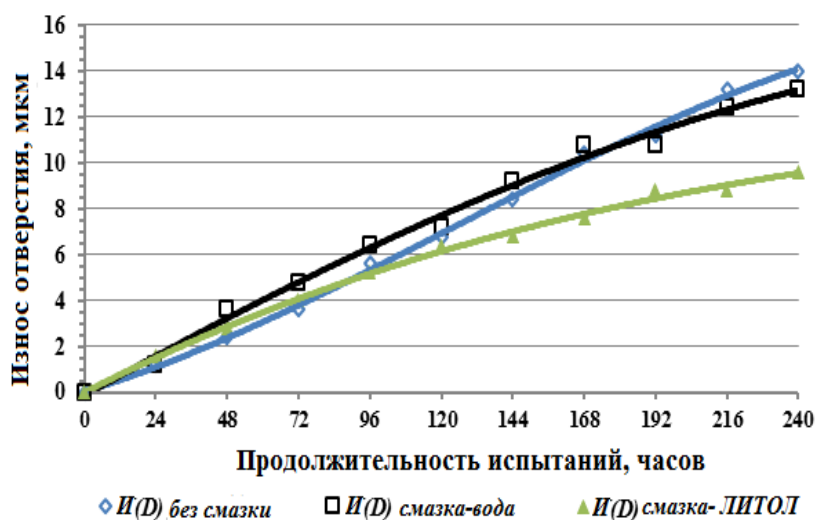


Рисунок 2 – Динамика износа металлического контртела при различных условиях смазки

Источник: разработано авторами

Интенсивность изменения зазора в парах трения определяли, используя выражение:

$$I_{\Delta S} = \frac{dS}{dL_f} \approx \frac{\Delta S}{dL_f} = \frac{\Delta S}{\Delta(v_f, t)} = \frac{\Delta S}{v_f \Delta t}, \quad (7)$$

где L_f – пройденный путь за время которого величина износа увеличилась на ΔS ;

v_f – скорость в зоне трения;

Δt – интервал времени между измерениями.

Таким образом, для пар трения, исследованных при трении без смазки, линейная интенсивность изменения величины зазора за 240 часов испытаний будет равной $6,03 \cdot 10^{-8}$, для условий трения в проточной воде и со смазкой Литол 24 соответственно $5,5 \cdot 10^{-8}$ и $3,6 \cdot 10^{-8}$. Другими словами можно сказать, что в исследуемой области в 240 часов зазор в парах трения при трении без смазки увеличился на 60 мкм за 1 км пройденного пути, при использовании воды на 55 мкм/км и 36 мкм/км при использовании смазки Литол 24.

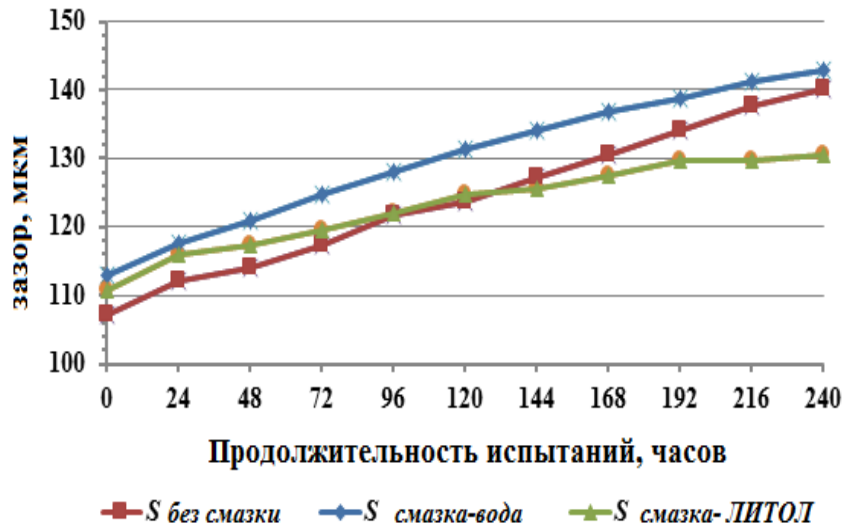


Рисунок 3 – Изменение величины зазора (S) в зависимости от продолжительности испытаний пары трения Ø40H9/e8 (ES=63мкм, EI=0, es=–50мкм, ei=–112мкм).

Источник: разработано авторами

Далее будет представлена информация (рис. 4) о сравнительных испытаниях, при тех же условиях, между парами трения с пористыми полимерными композициями и полимерной композицией без пор.

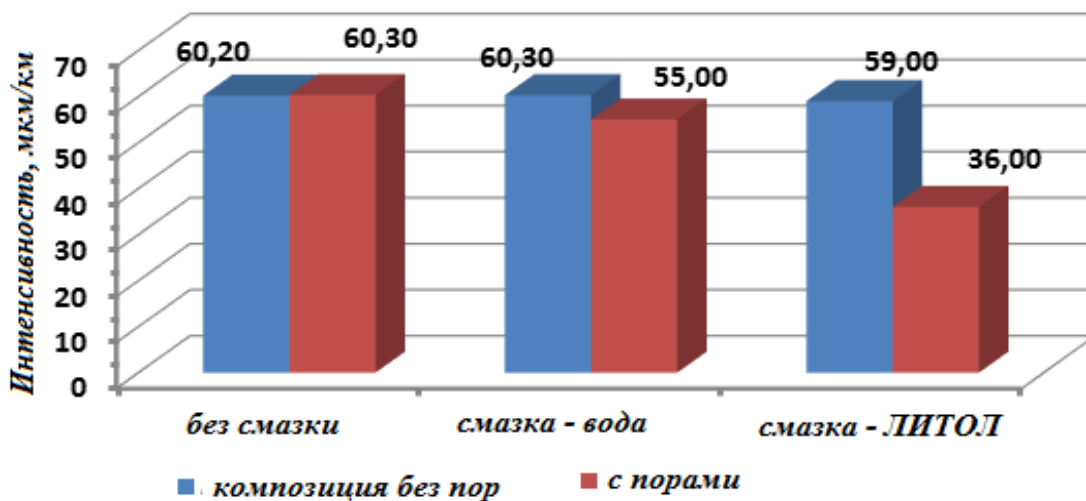


Рисунок 4 – Интенсивность изменения зазора в металлополимерных парах трения при посадке Ø40H9/e8, испытанных в течении 240 часов при следующих условиях: нагрузка P=1,5 МПа, скорость v=0,63 м/с и различных типах смазки

Источник: разработано авторами

Выводы. Было установлено, что интенсивность увеличения зазора в паре трения при использовании в качестве контртела в метало–полимерной паре трения, пористого полимерного покрытия на основе полиамидэпоксидной композиции, в условия смазки с Литолом, в 1,64 раза меньше чем при использовании таких покрытий без пор.

Полученные пористые покрытия показали более высокую износостойкость и при использовании в качестве смазки воды (1,1 раза меньше чем у базового).

Полученные результаты подтверждают наши предположения о том, что создание пористого поверхностного слоя в покрытии полимерной композиции будет

способствовать увеличению срока службы восстановленных пар трения путем замены обычной пары металл–металл на металл–полимерную.

Список литературы

1. Марьян Г.Ф. Восстановление посадочных мест отверстий корпусных деталей подшипниковых узлов электрических машин порошкообразными полимерными композициями. Диссерт. канд. техн. наук. Кишинэу, 1987. 163 с.
2. Sîrghii, V. Contribuții la asigurarea tehnologică a fiabilității pieselor utilajului agricol recondiționate cu aplicarea compozițiilor din mase plastic. Teza de doctor în tehnică. Chișinău, 2007. 252 p.
3. Țapu, V. Sporirea disponibilității și mentenabilității îmbinărilor cu joc renovate cu materiale compozite polimerice. Teza de doctor în tehnică. Chișinău, 2011. 132 p.

References

1. Marian, G.F. (1987). Vosstanovlenie posadochnykh mest otverstiy korpusnykh detaley podshpnikovyykh uzlov elektricheskikh mashin poroshkoobraznyimi polimernymi kompozitsiyami [Recovery of the housing holes of ball bearing elements of electrical machines using polymer compositions with powder consistence]. *Candidate's thesis*. Chisinau [in Russian].
2. SIRGHII V. (2007). Contributions to insure technological reliability of the agricultural machinery spare parts restored with plastic compositions: *PhD thesis*. Chisinau [in Romania].
3. TAPU V. (2011). Increasing the availability and maintainability of the joints with clearance restored by polymer composites. *PhD thesis*. Chisinau [in Romania].

Veaceslav Tapu, Associate Professor, Ph.D, Head of Department, **Vladimir Gorobet**, Associate Professor, Ph.D, Dean

State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova

Wear and Tear Resistance of Coupling Fits with Clearance Restored by Porous Epoxy Polyamide coatings

The using of polymeric materials as coatings for the restoration of worn-out machine parts has found application in the industry of repairment. Their wider use is hampered because of poor adhesion strength, shrinkage, ageing, low wetting ability and other properties of polymeric materials. To improve the physical and mechanical properties of polyamide P12, it is advisable to add to the composition of various substances that help to reduce shrinkage, ageing, increase wear resistance.

It is proposed to increase the oil absorption of the surface layers of polymer composite coatings by introducing 5...10% of sodium chloride (NaCl) into the composition. The obtained porous coatings were further subjected to wear tests under various lubrication conditions. The wear rate of the composite material under different lubrication conditions is different, so after 240 hours of testing, friction wear without lubrication was $18.8 \pm 2 \mu\text{m}$, when using water – $16.8 \pm 2 \mu\text{m}$, and when using LITOL 24 grease – $10 \pm 1 \mu\text{m}$... When using LITOL 24, a positive gradient of interfacial resistance of molecular bonds and surface layers is provided. Abrasion of the latter, as a rule, is not abrasive, but frictional and manifests itself in the separation of different, configurations of particles from the surface layer. Also, the lubricant is in the friction zone for longer because it is retained in the artificially formed pores of the surface layer of the coating. The presence of grease in the friction zone reduces the wear rate of the metal counter body. In those cases when there was no lubrication or there was water, the wear rate of the metal counter body was higher and practically had the same character. So, after 240 hours of testing, the following results were obtained: with friction and without lubrication $I_{n.l.} = 14 \pm 1 \mu\text{m}$; friction in the presence of running water $I_{\text{water}} = 13 \pm 1 \mu\text{m}$; friction when using Litol 24, $I = 9 \pm 1 \mu\text{m}$. Based on the results obtained, it can be stated that for a metal–porous polymer composite sliding friction pair, the types of lubricants affect the intensity of their wear. It should be noted that during the first hundred hours of testing, the evolution of the wear of the friction pair with different types of lubricant is practically the same and has a tendency to increase smoothly. This type of wear can be explained by the transfer of the composite material to the metal counter body. After removing this layer from the metal counter body, the process of its wear is different and depends on the type of lubricant. Metal counter bodies practically do not change the nature of wear when using water as a lubricant, as well as when friction without lubrication, but when using LITOL 24 lubricant, the wear rate is much less. The durability of friction pairs largely depends on the size of the gap. Thus, for the friction pairs studied with friction without lubrication, the linear intensity of the change in the gap value for 240 hours of testing will be $6.03 \cdot 10^{-8}$, for the condition of friction in running water and with Litol 24 lubricant, respectively $5.5 \cdot 10^{-8}$ and $3.6 \cdot 10^{-8}$. In other words, we can say that in the studied area of 240 hours, the gap in friction pairs with friction without lubrication increased by $60 \mu\text{m}$ per 1 km of the distance travelled, when using water at $55 \mu\text{m/km}$

and 36 $\mu\text{m}/\text{km}$ when using Litol 24 lubricant.

It was found that the intensity of the increase in the gap in the friction pair when using a porous polymer coating based on a polyamide epoxy composition as a counter body in a metal–polymer friction pair, under lubrication conditions with Litol, is 1.64 times less than when using such coatings without pores. The obtained porous coatings showed higher wear resistance when using water as a lubricant (1.1 times less than that of the base one). The results obtained confirm that the creation of a porous surface layer in the coating of the polymer composition will contribute to an increase in the service life of the recovered friction pairs by replacing the usual metal–metal pair with a metal–polymer one.

wear and tear, coating, wear and tear resistance, lubricants

Одержано (Received) 10.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 621.432

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.188-195>

М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, ст. наук. співр., **М.Я. Головчук**, асп., **В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **Г.Г. Веселівська**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна

e-mail: student.phmi@gmail.com, e-mail: fminanu1978@gmail.com, e-mail: golovchuk86@gmail.com, e-mail: gvosdetcki@gmail.com

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: marko60@ukr.net

Р.А. Яцюк, доц., канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Вплив складу шихтових матеріалів порошкових дротів на механічні характеристики та корозійну стійкість електродугових покриттів

Встановлено вплив шихтових матеріалів порошкових дротів на їх механічні характеристики, хімічну мікрогетерогенність та корозійну стійкість у середовищі водного розчину 3%NaCl. Показано, що на відміну від покриттів із суцільних дротів покриття, напилені із використанням порошкових дротів (ПД), мають високу хімічну гетерогенність. Це зумовлено тим, що краплини, які диспергуються із розплаву ПД та формують покриття мають неоднаковий хімічний склад. Спричинено це неповним сплавленням шихти та сталеві оболонки на торцях ПД під час електродугового напilenня покриттів. Для зменшення хімічної мікро гетерогенності запропоновано у шихту порошкового дроту що містить хром, бор, вуглець місткі компоненти (Cr, FX, ПГ-100, В₄С, ФХБ) додавати порошки феросплавів FeSi, FeMn та самофлюсу ПГ-10Н-01, які сприяють утворенню евтектик між складниками шихти, гомогенізують розплав ПД та, як наслідок, зменшують мікрогетерогенність покриттів. Наявність у шихті ПД 90Х17РГС та ПД 75Х19Р3ГС2 хрому, ферохрому, ферокремнію та феромарганцю зумовлює мінімальну хімічну мікрогетерогенність покриттів з цих дротів і, як наслідок забезпечує їх високу корозійну тривкість, що наближається до корозійної тривкості напів сталі Х18Н9Т.

покриття, порошкові дроти, мікро гетерогенність, мікротвердість, корозійна тривкість

М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, ст. научн. сотр., **М.Я. Головчук**, асп., **В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., **Г.Г. Веселівська**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Физико-механический институт НАН Украины, г. Львов, Украина

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Р.А. Яцюк, доц., канд. техн. наук

Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина

Влияние состава шихтовых материалов порошковых проволок на механические характеристики и коррозионную стойкость электродуговых покрытий

Установлено влияние шихтовых материалов порошковых проволок на их механические характеристики, химическую микрогетерогенность и коррозионную стойкость в среде водного раствора 3% NaCl. Показано, что в отличие от покрытий из сплошных проводов покрытия, напыленные с использованием порошковых проволок (ПД), имеют высокую химическую гетерогенность. Это обусловлено тем, что капли, которые диспергируются с расплава ПД и формируют покрытия имеют неодинаковый химический состав. Причины этого вызваны неполным сплавлением шихты и стальной оболочки на торцах ПД при электродуговом напылении покрытий. Для уменьшения химической микрогетерогенности предложено в шихту порошковой проволоки содержащей хром, бор, углерод-вместительные компоненты (Cr, ФХ, ПГ-100, В4С, ФХБ) добавлять порошки ферросплавов FeSi, FeMn и самофлюса ПГ-10Н-01, которые способствуют образованию эвтектик между составляющими шихты, гомогенизируют расплав ПД и, как следствие, уменьшают микрогетерогенность покрытий. Наличие в шихте ПД 90Х17РГС и ПД 75Х19РЗГС2 хрома, феррохрома, феррокремния и ферромарганца приводит к минимальной химической микрогетерогенности покрытий из этих проволок и, как следствие, обеспечивает их высокую коррозионную стойкость, которая приближается к коррозионной стойкости наждающей стали Х18Н9Т.

покрытия, порошковые проволоки, микрогетерогенность, микротвердость, коррозионная стойкость

Постановка проблеми. Електродугове напилення покриттів широко використовується у промисловості, для відновлення розмірів деталей машин а також для захисту від абразивного та газоабразивного зношування, як за кімнатних так і за підвищених температур [1-3]. Електродугові покриття, напилені суцільними, однорідними за складом дротами, достатньо гомогенні за хімічним складом. Разом з тим, як правило, їх хімічний склад істотно відрізнявся від складу дроту, розпиленням якого отримували покриття. Це відбувалося внаслідок інтенсивного вигорання вуглецю із розплавлених краплин, випаровування елементів, яким властива висока пружність дисоціації парів (таких як Zn, Mn, Cr), окиснення Al, Ti, Cr і Fe з утворенням оксидних фаз.

На відміну від покриттів із суцільних дротів, покриття, напилені із використанням порошкових дротів (ПД), мають високу хімічну гетерогенність. Це зумовлено тим, що краплини, які диспергуються із розплаву ПД та формують покриття мають неоднаковий хімічний склад. Спричинено це неповним сплавленням шихти та сталеві оболонки на торцях ПД під час електродугового напилення покриттів. Ванна розплавленого металу, яка формується на торцях ПД під час напилювання покриттів, вже впродовж долей секунди подрібнюється повітряним струменем на дрібні краплі розплавленого металу. Тому шихта, що містить легувальні елементи, не встигає розчинитися і змішатися з розплавом сталеві оболонки. Як наслідок, дисперговані повітряним струменем краплини мають різний хімічний склад, а, отже, формують високо неоднорідні покриття зі значною хімічною гетерогенністю. Така хімічна гетерогенність отриманих покриттів буде суттєво впливати на їх фізико-механічні характеристики як за кімнатної, так і за підвищеної температури і особливо відчутно за дії корозивних середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений огляд літературних джерел показав, що ПД, які використовуються як витратні електродні матеріали для

електродугового напилення покриттів, дають змогу отримувати покриття із високими експлуатаційними характеристиками [4-6]. Електродугові покриття із ПД застосовують для відновлення геометричних розмірів деталей машин, для захисту від абразивного зношування як за кімнатних так і за підвищених температур а також для захисту від корозійно-абразивного зношування у технологічних середовищах [7,8]. Однак висока хімічна гетерогенність особливо за вмістом хрому в окремих ламелях покриття утворює гальванічні пари в корозійних середовищах та швидко виводить із ладу покриття. Тому пошук шляхів підвищення хімічної гетерогенності покриттів із ПД є актуальним завданням.

Постановка завдання. Для ефективного застосування відновлених деталей електродуговим напиленням покриттів із ПД за наявності корозійних середовищ необхідно встановити взаємозв'язок між компонентами шихти ПД та хімічною гетерогенністю покриттів.. Наявність цієї інформації дозволить розробляти нові порошкові дроти для електродугового напилення зносостійких покриттів із підвищеним вмістом легувальних елементів для експлуатації в робочих корозивних середовищах.

Виклад основного матеріалу. Електродугові покриття отримували на оригінальному обладнанні, розробленому та виготовленому у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України (рис.1). Для напилювання використовували модельні ПД базових систем легування Fe–Cr–C та Fe–Cr–В діаметром 2,0 мм.

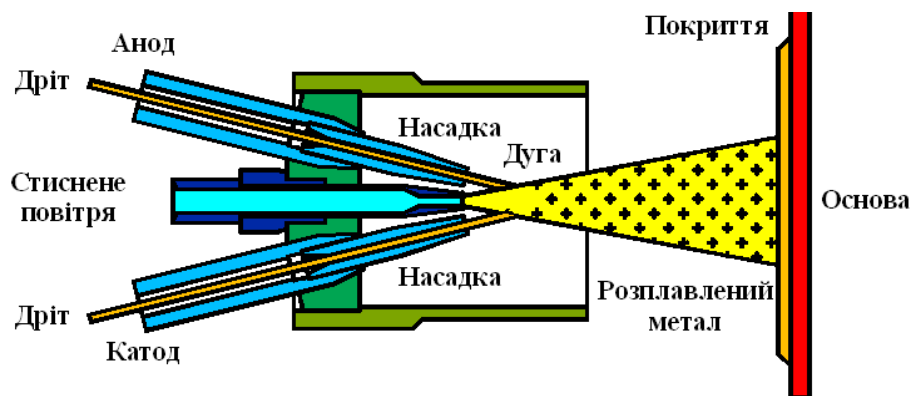


Рисунок 1 – Типова схема формування електродугових покриттів

Для кількісного оцінювання величини хімічної гетерогенності електродугових покриттів використали показник хімічної мікрогетерогенності у вигляді коефіцієнта K_{MG} , який визначається з виразу:

$$K_{MG} = \left(\sum_{i=1}^n |c_{сер} - c_i| \right) / n \times c_{сер},$$

де n – кількість прямокутних ділянок площею $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$, виділених на фото мікроструктури покриттів, на яких мікрорентгенівським спектральним аналізом визначали вміст кожного елемента c_i в межах окремих ламелей та середній вміст елемента $c_{сер}$ у покриттях.

Для того, щоб отримувати електродугові покриття із високою корозійною тривкістю в агресивних середовищах необхідно забезпечити низьку хімічну мікрогетерогенність покриттів та достатньо високий (понад 12 мас. %) вміст хрому в кожній з його ламелей.

Вибір компонентів шихти порошкових дріт для мінімізації хімічної мікрогетерогенності електродугових покриттів

Для зменшення хімічної мікрогетерогенності покриттів до складу шихти ПД запропоновано додавати інгредієнти, які здатні утворювати евтектики з низькою температурою плавлення та можуть розчиняти у собі такі тугоплавкі компоненти шихти як карбіди, бори, тугоплавкі метали та сплави.

Крім того, евтектичним сплавам з низькою температурою плавлення властиві також ще і самофлюсні властивості. Завдяки цьому такі сплави можуть взаємодіяти із тугоплавкими оксидами (зокрема такими як Cr_2O_3 та Al_2O_3 , температура плавлення яких $T_{\text{пл}}$ становить 2435 та 2050 °C відповідно) з утворенням оксидних сполук, плавлення яких відбувається за значно нижчих температур.

При розробленні складу ПД для електродугового напилювання покриттів, які мають експлуатуватися за умов абразивного зношування в корозивних середовищах, необхідно використовувати ПД якомога найменшого діаметру. Однак це не завжди можливо здійснити, оскільки важко забезпечити необхідний вміст хром, вуглець та бор містких компонентів у складі шихти ПД невеликого діаметру.

Тому для того щоб вміст хрому у кожній з ламелей покриття перевищував 12 мас. % (щоб забезпечити необхідну корозійну стійкість покриттям) необхідно було використовувати ПД більшого діаметра - 2,2 мм.

Для розроблення дослідних партій ПД було досліджено 6 ПД із різними компонентами шихти. Це перш за все хром, бор, вуглець місткі компоненти (Cr, ФХ, ПГ-100, B_4C , ФХБ) з додаванням FeSi, FeMn та самофлюсу ПГ-10Н-01, які сприяють утворенню евтектик між складниками шихти, гомогенізують розплав ПД та, як наслідок, зменшують мікрогетерогенність покриттів рис. 2.

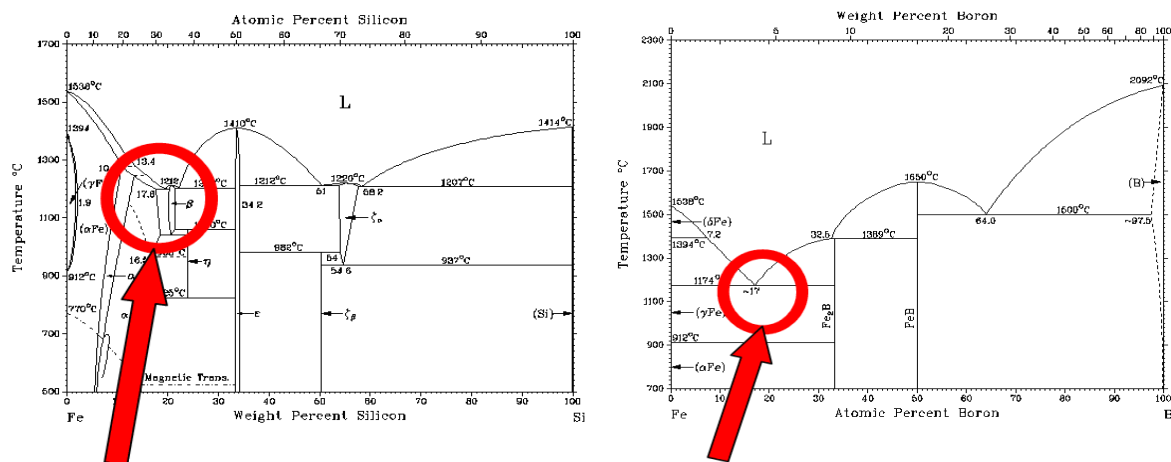


Рисунок 2. - Діаграма стану для таких компонентів як залізо та кремній, що можуть утворювати легкоплавку евтектику Fe-Si, температура плавлення якої становить 1212 °C

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 - Склад ПД та механічні характеристики покриттів із ПД для напильовання корозійностійких покриттів

Хімічний склад дроту (компонентний склад шихти)	Середній вміст Cr у ламелях, мас. %	K_{MG}	Залишкові напруження розтягу, МПа	Когезивна міцність, МПа	Мікро- твердість, HV _{0,3}	Струм корозії, 10 ⁻⁴ мА
№1 ПД 60X15P2ГС склад шихти (Cr+B ₄ C+FeSi+FeMn)	14,5	0,07	23,6	140	560	6
№2: ПД 20X16P3H2ГС склад шихти (FeCrB ₂ + Cr + + ПГ10-Н-01)	16,4	0,06	41,9	100	690	5
№3 ПД 90X17РГС склад шихти (FeCrB ₂ + ФХ+Cr+ +FeSi+FeMn)	17,4	0,05	76,9	185	625	2
№4 ПД 75X19P3C2 склад шихти (Cr+B ₄ C + FeSi)	18,6	0,1	66,8	150	545	5
№5 ПД Х17P3СЮ склад шихти (FeCrB ₂ +Cr+ FeSi)	17,1	0,15	6,17	80	700	14

Джерело: розроблено авторами

Найбільшу твердість показало покриття з порошкових дротів ПД 20X16P3H2СЮ та ПД Х17P3СЮ. Високу твердість цим покриттям забезпечила наявність у шихті ПД 3 мас. % бору. Бор вводили до шихти цих ПД у вигляді ферохромбору ФХБ-2. Фазовий аналіз таких покриттів показав, що у їх феритній структурі є дрібнодисперсні виділення боридів FeCrB та FeCr₂B. Однак когезивна міцність таких покриттів не перевищувала 100 МПа. Це зумовлено тим, що під час їх напильовання у структурі покриттів виникали напруження розтягу першого роду. Такі напруження могли спричиняти появу тріщин у покриттях під час їх наступного механічного оброблення. Для відповідальних деталей перед нанесенням на їх поверхню покриттів із таких ПД необхідно використовувати підігрівання основи до 150...200 °С. Додавання до шихти ПД карбіду бору (як бор місткого компонента) не забезпечив достатньо високої твердості цим покриттям. Очевидно, що в цьому випадку частинки карбіду бору не повністю розчинялись у розплаві ПД, із якого формувалося покриття. Значна частина частинок карбіду бору вивувалася із шихти ПД повітряним струменем під час напильовання покриттів.

Дещо меншу твердість показали покриття із ПД 90X17РГС. Таку твердість забезпечила їм мартенситна матриця, додатково зміцнена дрібнодисперсними включеннями боридів FeCr₂B. Покриття із такого ПД мають суттєво вищу когезійну міцність (до 185 МПа) та низький рівень залишкових напружень першого роду за рахунок мартенситної матриці. Адже внаслідок остигання краплин на поверхні напильованої деталі покриття зменшується в розмірах. Це зумовлює формування колових напружень першого роду. Оскільки коефіцієнт термічного розширення мартенситу є найнижчим, а аустеніту найвищим, то внаслідок формування матричної

фази мартенситу у покриттях виникали лише незначні напруження розтягу. Такі покриття легше обробляти оскільки для їх механічного оброблення можна застосовувати значно жорсткіші режими шліфування без загрози виникнення у них тріщин чи відшаровування отриманих покриттів від підкладки.

Корозійна тривкість електродугових покриттів із розроблених ПД після їх різної експозиції в 3%-му водному розчині NaCl

З використанням потенціодинамічних досліджень дослідили закономірності взаємодії електродугових покриттів з розроблених ПД, які відрізнялися за складом шихти, з 3% розчином NaCl. З поляризаційних кривих зробили висновок, що аналізовані покриття з усіх розроблених ПД суттєво не відрізняються за характером їх корозійної взаємодії з середовищем.

За тривалості витримання зразків із розробленими електродуговими покриттями у корозивному середовищі понад 2 доби їх струми корозії зростали, тобто зменшувалася корозійна тривкість цих покриттів рис.3.. Причиною цього є їх наскрізна поруватість. За тривалого витримання середовище просочувалося в напрямі до сталеві основи. При цьому площа взаємодії середовища і покриття збільшувалася. Крім того за значної пористості покриттів середовище могло проникати безпосередньо до сталеві основи (сталь 20) і викликати підплівкову корозію, внаслідок якої виникали умови для відшарування покриття. Просочування покриттів інгібіторами корозії може стати ефективним запобіжним заходом проти виникнення підплівкової корозії.

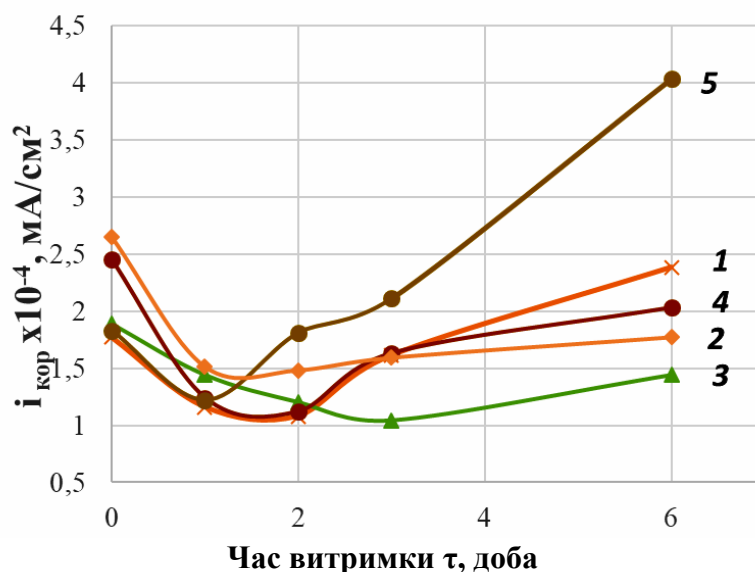


Рисунок 3 - Корозійна тривкість електродугових покриттів з різних ПД (1 - ПД 60X15P2ГС, 2 – ПД 20X16P3H2CЮ, 3 - ПД 90X17PГС, 4 – ПД 75X19P3C2, 5 - ПД X17P3CЮ) залежно від їх експозиції в 3% розчині NaCl

Джерело: розроблено авторами

Виявлено (табл. 1), що збільшення вмісту хрому у покриттях системи Fe-Cr-C-B від 12 до 17 мас. % проявилася зниженням струмів корозії, що пояснили формуванням мартенситу - матричної фази у структурі покриттів із розподіленими на її фоні боридами на основі хрому. За низького вмісту хрому у ПД, частина хрому під час формування покриттів витрачається на утворення боридів. Внаслідок цього в твердому розчині хрому залишається менше. Це призводить до значної мікрогетерогенності покриття через різницю за вмістом хрому в різних лам елях. Як наслідок виникає велика кількість гальванічних пар, що інтенсифікує електрохімічну корозію.

Наявність у шихті ПД 90X17PГC та ПД 75X19P3ГC2 хрому, ферохрому, ферокремнію та феромарганцю спричинила мінімальну хімічну мікрогетерогенність покриттів з цих дротів і, як наслідок, їх високу корозійну тривкість, що наближалася до корозійної тривкості нержавної сталі X18H9T. Наявність у шихті ПД №2 ферохромбору, хрому та самофлюсної лігатури ПГ-10-Н-01 забезпечило високий вміст хрому у покритті, низький коефіцієнт мікрогетерогенності та високу корозійну тривкість табл. 2.

Таблиця 2 – Властивості ПД, запропонованих для виготовлення дослідних партій

Марка дроту	Коефіцієнт мікрогетерогенності K_{MG}	Струм корозії, мА/см ²
№3 90X17PГC	0,06	0,0002
№5 75X19P3C2	0,06	0,0002
Нержавна сталь X18H9T	-	0,0001

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Для підвищення повноти сплавлення компонентів шихти ПД між собою та його сталеву оболонку запропоновано додавати до шихти ПД порошки феросплавів Fe-Mn, Fe-Si, які мають низьку температуру плавлення, здатні взаємодіяти із тугоплавкими компонентами шихти з утворенням низькотемпературних евтектик.

2. Додавання до складу шихти на основі ферохромбору та ферохрому порошків ферокремнію, феромарганцю та самофлюсного сплаву ПН-10Н-01 забезпечило високу твердість електродугових покриттів, малу їх гетерогенність за вмістом хрому у ламелях покриття і, як наслідок, високу корозійну тривкість на рівні нержавної сталі.

Список літератури

1. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. V. Hvozdet's'kyi, M. Ya. Holovchuk, M. S. Romaniv. *Materials Science*. 2009. Vol.44, №4. P. 481-489.
2. Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings / H. V. Pokhmurs'ka, M. Ya. Holovchuk, Yu. V. Dz'oba, V. M. Hvozdet's'kyi, L. V. Dzyubyk. *Materials Science*. 2018. Vol.53, №6. P. 868-874.
3. М. М. Студент, М. Я. Головчук, В. М. Гвоздецький. Вплив хімічного складу порошкових дротів на структуру та зносостійкість покриттів різного хімічного складу. *Проблеми трибології*. 2017. №3. С. 56-61.
4. Korobov Yury. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering *Coatings*. 2018. Vol. 8(2), 71.
5. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе феробора, полученных из порошковых проволок / А. Л. Борисова, И. В. Миц, Т. В. Кайда [и др.]. *Автоматическая сварка*. 1991. 9. С. 66 – 68.
6. Dallaire S., Levert H. Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 1992. 50, 2, P. 241 – 248.
7. Багатофункціональні електродугові покриття / М.М. Студент та ін.; Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Видавництво “Простір-М”, 350. С. 2018.
8. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying / Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014, Vol. 2014. |Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739>

Referencis

1. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyi, V.V., Holovchuk, M. Ya. & Romaniv, M.S. (2009). Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings. *Materials Science*. Vol.44, 4, 481-489 [in English].
2. Pokhmurs'ka, H.V., Holovchuk, M.Ya., Dz'oba, Yu. V., Hvozdet's'kyi, V.M. & Dzyubyk L.V. (2018). Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings. *Materials Science*, Vol.53, 6, 868-874 [in English].
3. Student, M.M., Holovchuk, M.Ya. & Hvozdet's'kyj, V.M. (2017). Vplyv khimichnoho skladu poroshkovykh drotiv na strukturu ta znosostykyist' pokryttiv riznoho khimichnoho skladu [Influence of chemical composition of flux-cored wires on the structure and wear resistance of coatings of different chemical composition]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, 3, 56-61 [in Ukrainian].
4. Korobov Yury (2018). Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering. *Coatings*, 8(2), 71 [in English].
5. Borisova, A.L. et al. (1991). Struktura i svojstva jelektrodugovykh pokrytij na osnove ferobora, poluchennyh iz poroshkovykh provolok [Structure and properties of ferroboration-based electric arc coatings obtained from flux-cored wires]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 9, 66 – 68 [in Russian].
6. Dallaire, S. & Levert, H. (1992). Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*, 50, 2, 241 – 248 [in English].
7. Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyj, V.M., Stupnyts'kyj, T.R., Posuvajlo, V.M. & Markovych, S.I. (2018). Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]. Vydavnytstvo “Prostir-M” [in Ukrainian].
8. Ana Arizmendi-Morquero, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López (2014). Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014. [Article ID 836739 <https://doi.org/10.1155/2014/836739>] [in English].

Mykhajlo Student, Prof., DSc., Senior Researcher, **Myroslav Golovchuk**, post-graduate, **Volodymyr Hvozdet's'kii**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Halyna Veselivska**, PhD tech. sci., Senior Researcher
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Rostyslav Yatsyuk, Assos. Prof., PhD tech. sci., Senior Researcher

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Influence of Composition of Charge Materials of Flux-cored Wires on Mechanical Characteristics and Corrosion Resistance of Electric Arc Coatings

The influence of charge materials of flux-cored wires on their mechanical characteristics, chemical microheterogeneity and corrosion resistance in an aqueous solution of 3% NaCl was established. It is shown that, in contrast to coatings made of solid wires, coatings sprayed using flux-cored wires (PO) have a high chemical heterogeneity. This is due to the fact that the droplets that disperse from the PD melt and form a coating have different chemical compositions. This is caused by incomplete fusion of the charge and steel shell at the ends of the PD during electric arc spraying of coatings. To reduce the chemical micro-heterogeneity, it is proposed to add powders of ferroalloys FeSi, FeMn and self-flux PG-10H-01 to the charge of powder wire containing chromium, boron, carbon-containing components (Cr, FH, PG-100, B4C, FCB) between the components of the charge, homogenize the melt of PD and, as a consequence, reduce the microheterogeneity of the coatings. The presence of chromium, ferrochrome, ferro-silicon and ferromanganese in the charge of PD 90X17PGC and PD 75X19P3GC2 determines the minimum chemical microheterogeneity of coatings from these wires and, as a result, ensures their high corrosion resistance, which is close to corrosion steel18.

To increase the completeness of fusion of the components of the PD charge between itself and its steel shell, it is proposed to add to the PD charge powders of ferroalloys Fe-Mn, Fe-Si, which have a low melting point, able to interact with refractory components of the charge to form low-temperature eutectics.

The addition of ferro-silicon, ferromanganese and self-flux alloy PN-10H-01 powders based on ferrochrom and ferrochrome provided high hardness of electric arc coatings, low heterogeneity in terms of chromium content in coating lamellae and, as a consequence, high corrosion resistance.

coating, flux-cored wires, micro heterogeneity, microhardness, corrosion resistance

Одержано (Received) 11.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 628.0.032-405.08

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.196-205>

В.И. Ветохин, доц., д-р техн. наук

Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина

e-mail: veto.vladim@gmail.com

В.В. Голдыбан, канд. техн. наук, **М.И. Курилович**

РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: labpotato@mail.ru

Способ и устройство для автоматического распознавания некондиционных клубней картофеля

В статье приведено описание макетного образца автоматической сортировальной машины, предназначенной для распознавания внешних дефектов клубней картофеля и их автоматической инспекции струей сжатого воздуха. Процесс распознавания состоял из трёх основных модулей: сегментации, трекинга движущегося в кадре по конвейеру картофеля и классификации с помощью обученной искусственной нейронной сети. Для сегментации клубней картофеля на фоне транспортирующего конвейера в режиме реального времени использован метод, основанный на вычислении цветового порога. Для трекинга движущихся клубней картофеля использовался алгоритм центроидного трекинга. Для обучения искусственной нейронной сети был создан собственный набор данных, состоящий из изображений товарных и дефектных клубней картофеля.

клубень картофеля, дефект, автоматическая сортировка, машинное зрение

В.І. Ветохін, доц., д-р техн. наук

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

В.В. Голдыбан, канд. техн. наук, **М.І. Курилович**

РУП «НПЦ НАН Білорусі по механізації сільського господарства». м. Мінськ, Республіка Білорусь

Спосіб і пристрій для автоматичного розпізнання некондиційних бульб картоплі

У статті наведений опис макетного зразка автоматичної сортувальної машини, призначеної для розпізнавання зовнішніх дефектів бульб картоплі і їх автоматичної інспекції струменем стисненого повітря. Процес розпізнавання складався із трьох основних модулів: сегментації, трекінга, що рухається в кадрові по конвеєру картоплі й класифікації за допомогою навченої штучної нейронної мережі. Для сегментації бульб картоплі на фоні транспортуючого конвеєра в режимі реального часу використаний метод, заснований на обчисленні колірної порогової. Для трекінга бульб картоплі, що рухаються, використовувався алгоритм центроїдного трекінга. Для навчання штучної нейронної мережі був створений власний набір даних, що складається із зображень товарних і дефектних бульб картоплі.

бульба картоплі, дефект, автоматичне сортування, машинний зір

Постановка проблемы. Для производительной и точной сортировки картофеля создаются нетрудоемкие современные методы, такие как машинное зрение. Основой этого метода является фото/видео съемка образцов, анализ изображений, сравнение их со стандартом и принятие решения об отделении некондиционных образцов из общего потока.

© В.И. Ветохин, В.В. Голдыбан, М.И. Курилович, 2020

Анализ последних исследований и публикаций. Учеными исследовались разные методы и способы для автоматической сортировки корнеклубнеплодов.

Так, Я.С. Нордоном из Вагенингского Университета (Нидерланды) предложена разработка высокоскоростной системы машинного зрения для контроля качества и сортировки картофеля по размеру, его форме и внешним дефектам [1].

Н.В. Бышовым из Рязанского государственного агротехнологического университета (Российская Федерация) предложена разработка идентификационного устройства для создания набора эталонных данных геометрических параметров и цветовой информации основанной на применении акустооптического перестраиваемого фильтра, который формирует поток оптического излучения, освещающего поверхность клубней картофеля [2].

А. Голмохамади из Табрицкого Университета (Иран) предложена разработка сортировочной машины для картофеля посредством обработки изображений в рамках проекта машинного зрения [3].

Р. Мартели из Болонского Университета (Италия) предложен метод идентификации и оценки для обнаружения внешних повреждений картофеля с помощью системы автоматического распознавания изображений [4].

М. Таваколи из Исламского Университета Азад (Иран) была создана техника для определения проросших участков картофеля с использованием систем машинного зрения [5].

М. Барнесом из Университета Линкольна (Великобритания) представлено решение, основанное на минимализме программы AdaBoost для выявления дефектных пятен, присутствующих в изображениях картофеля [6].

Ху Донгангом из Хуацзоньского сельскохозяйственного Университета (Китай) предложен метод сортировки картофеля по форме с помощью систем технического зрения [7].

М.Р. Ахмедом из Мичиганского Университета (США) предложили метод гиперспектрального изображения, который может быть использован для ускорения получения изображения, прогнозирования и обнаружения дефектов [8].

Т. Фангом из Китайского сельскохозяйственного университета и Национального научно-исследовательского центра агроперерабатывающего оборудования Китая был предложен неразрушающий метод обнаружения ризоктониоза картофеля, основанный на технологии машинного зрения [9].

Н. Эльсайдом из научно-исследовательского института сельскохозяйственного машиностроения (Египет) была разработана система сортировки клубней картофеля, с помощью акустического ударного метода [10].

Как видим из представленного обзора, наиболее перспективным направлением в области сортировки картофеля является применение систем технического зрения и автоматической инспекции. В основу данного метода положен принцип визуального анализа данных, согласно которому полученные с видеокамеры изображения движущихся по конвейеру клубней обрабатываются и формируются в образы, с последующей классификацией и выдачей соответствующего управляющего сигнала на блок управления сортировочной машины, который активизирует исполнительное устройство.

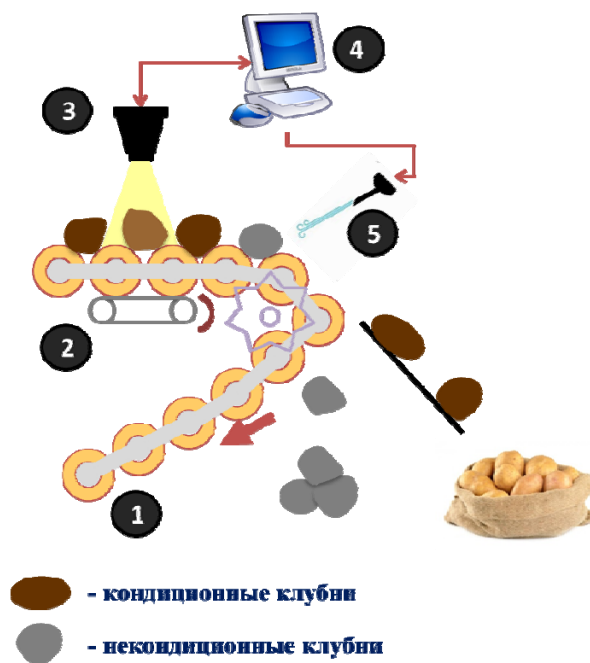
Постановка задачи. Целью статьи является повышение качества и производительности сортировки путём разработки способа и интеллектуального устройства для автоматического распознавания и инспекции некондиционных клубней картофеля.

Изложение основного материала. В настоящее время отечественными производителями сортировка некондиционных клубней картофеля для последующей товарной реализации выполняется на переборочных столах. Ворох картофеля, поступающий на сортирующие устройства, представляет собой смесь товарных и дефектных клубней. Задача сортировки заключается в разделении дефектных клубней от общей поступающей массы картофеля согласно предъявляемым требованиям к обрабатываемой продукции ГОСТ 26832-86-2010 [11]. Для сортировки продовольственного картофеля РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», при участии «ОИПИ НАН Беларуси», разработан и изготовлен макетный образец автоматической сортировальной машины, принципиальная схема которого представлена на рис.1.

Она состоит из рамы, вальцово-подающего конвейера, механизмов привода, системы распознавания, состоящей из видеокамеры и персонального компьютера, и пневматической системы отделения.

Рама установки выполнена из конструкционного алюминиевого профиля для создания определённой прочности и жёсткости конструкции, и удобства монтажа на неё основных узлов установки и электрооборудования.

Вальцово-подающий конвейер представляет собой бесконечный тяговый рабочий орган с закрепленными на нем вальцами. Рабочая поверхность вальцов выполнена в виде однополосного гиперболоида вращения. Параметры вальцево-подающего конвейера: длина $l = 160$ мм, максимальный диаметр $d_{\max} = 70$ мм, минимальный диаметр $d_{\min} = 60$ мм, зазором между вальцами $c = 21$ мм, количество вальцов – 36. Вальцовый конвейер предназначен для транспортировки и вращения клубней картофеля.

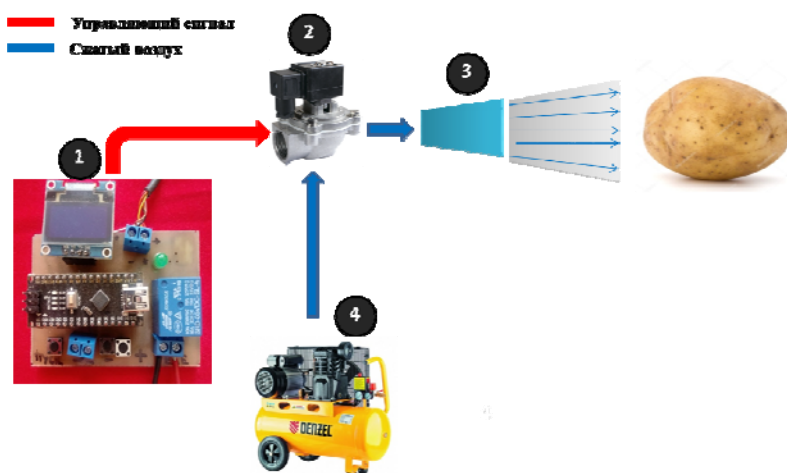


1 – вальцово-подающий конвейер; 2 – приводной ремень; 3 —промышленная скоростная видеокамера;
4 – вычислительный модуль в виде компьютера; 5 – система отделения

Рисунок 1 – Принципиальная схема макетного образца автоматической сортировальной машины
Источник: разработано авторами

Для вращения клубней в зоне системы распознавания предусмотрен механизм привода валцов, который состоит из мотор-редуктора, приводного ремня 1, шкивов 2. Валцы, в области механизма привода, вращаются посредством трения о приводной ремень. Частота вращения валцов регулируется посредством мотор-редуктора.

Пневматическая система отделения некондиционных клубней картофеля состоит из электронного блока управления 1, импульсного клапана 2, форсунки 3, компрессора 4 (рис. 2). Она предназначена для отделения некондиционных клубней картофеля струей сжатого воздуха.



1 – электронный блок управления; 2 – импульсный клапан; 3 – форсунка; 4 – компрессор

Рисунок 2 – Схема пневматической системы отделения

Источник: разработано авторами

Импульсный клапан осуществляет кратковременную подачу воздуха. Для управления режимом работы импульсного клапана специально изготовлен электронный управляющий блок, который подключён к вычислительному модулю через виртуальный COM-порт. Блок управления позволяет установить необходимую длительность открытия клапана.

Система распознавания состоит из механического защищенного корпуса, высокоскоростной камеры, вычислительного модуля, структурированной подсветки, модуля коммуникации с пневматической системой отделения. Она предназначена для распознавания дефектов клубней картофеля и выдачи сигнала исполнительному устройству.

Основной задачей системы распознавания является формирование и выдача блоку управления автоматической сортировальной машины данных, содержащих информацию о кондиции клубня картофеля и номер его позиции на линейном транспортёре. Эта информация используется для активизации пневмоклапана, установленного на транспортёре.

Механический защищённый корпус представляет собой составное каркасное изделие. Корпус предназначен для выполнения следующих функций:

- фиксации видеокамеры машинного зрения и структурированной подсветки на определенном расстоянии от вальцового конвейера, перемещающего клубни картофеля;
- перекрытие доступа попадания на анализируемый видеокамерой машинного зрения картофель стороннего света, кроме собственной структурированной подсветки.

Для захвата и передачи графических изображений, движущихся на транспортёре клубней картофеля, в вычислительный модуль для последующего их анализа с целью

определения их кондиции используется видеокамера машинного зрения. Видеокамера машинного зрения состоит из блока высокоскоростной промышленной видеокамеры, имеющего пыле- и влагозащищённый корпус с креплениями, и оптического объектива с механической настройкой резкости. Блок высокоскоростной видеокамеры имеет промышленные разъёмы для подключения электропитания и информационного канала, которые выходят из защищенного механического корпуса через специальные отверстия.

Структурированная подсветка предназначена для равномерного освещения рабочей области, необходимого для правильного функционирования изделия, и включает линейный светодиодный модуль и источник электропитания светодиодного модуля напряжением 24 В. Учитывая требования к системе распознавания, в качестве структурированной подсветки было решено использовать современные светодиодные ленты, обладающие рядом положительных характеристик.

В качестве блока высокоскоростной видеокамеры была выбрана видеокамера машинного зрения VCXU-13C, которая размещена в механическом защищенном корпусе размером 800×360×490 мм, скорость съёмки – 222 кадров/с. Электропитание совмещено с информационными каналами и подаётся по интерфейсу USB 3.0.

В качестве оптического объектива для высокоскоростной камеры был выбран объектив 0814MM-C со следующими параметрами: оптимальный размер прибора с зарядовой связью матрицы 2Мп и 1/2“, фокусное расстояние $f=8$ мм, диафрагма F1.4, тип крепления к камере C-mount.

Учитывая требования функционирования оптической системы распознавания, в качестве вычислительного модуля был выбран ноутбук HP Pav Gaming 15, оснащённый дискретной видеокартой NVidia.

Для сегментации изображения, т.е. отделения изображений картофеля от конвейера, который в данном случае является фоном, был выбран алгоритм сегментации по цветовому порогу [12-14].

Так как конвейер светлый, а картофель тёмный, то можно подобрать пороговое значения, при котором пиксели ниже заданного порога будут относиться к картофелю, а пиксели выше заданного порога будут принадлежать конвейеру. Бинарное изображение, полученное после применения порогового значения $thresh = 170$, показано на рис. 3.

Проблема бинаризации изображения конвейера по порогу состоит в том, что яркость теневых участков конвейера и яркость картофеля совпадают. Кроме этого, промежутки между валиками имеют низкую яркость, что также отмечается алгоритмом как картофель. Для преодоления этого недостатка используется следующий алгоритм:

- 1) посчитать сумму пикселей в каждой строке маски анализируемого изображения;

- 2) если эта сумма меньше заданной минимальной ширины картофеля в пикселях, то такая строка считается принадлежащей конвейеру и помечается нулевыми значениями (фон);

- 3) применить морфологические преобразования.

Результат применения такого алгоритма показан на рис. 4. На маске изображения конвейера с картофелем остались артефакты фона. Они удаляются путём анализа площади связанных компонентов. Если площадь ниже порогового значения, то такой компонент относится к конвейеру, иначе – к картофелю.



Рисунок 3 – Результат пороговой сегментации картофеля

Источник: разработано авторами



Рисунок 4 – Результат применения алгоритма сегментации, основанного на анализе яркости изображения

Источник: разработано авторами

Для окончательного принятия решения о качестве картофеля сравнивается несколько его проекций. В результате, пока картофель проходит в рабочей зоне видеокамеры машинного зрения, он успевает попасть на несколько её кадров. Чтобы не перепутать клубни картофеля между собой, потребовалось сопоставлять информацию, полученную по различным последовательным кадрам. Для этого в систему встроены алгоритм центроидного трекинга движущихся клубней картофеля.

На вход алгоритма трекинга поступает набор координат прямоугольников, ограничивающих клубни картофеля. Алгоритм трекинга учитывает информацию, сгенерированную им для предыдущего кадра видеопоследовательности (если он не первый), и выдаёт каждому ограничивающему прямоугольнику текущего кадра уникальный номер (назначает ИД). Тем самым алгоритм сопоставляет картофель на двух кадрах, т.е. позволяет идентифицировать один и тот же картофель на разных кадрах как один, а не как несколько разных. Это позволяет «не выпускать из виду» клубни картофеля в процессе их движения по всей рабочей области видеокамеры машинного зрения. На рис. 5 приведена блок-схема работы алгоритма трекинга движущихся клубней картофеля.

Здесь $BBList$ обозначает список координат ограничивающих прямоугольников (x_1, y_1, x_2, y_2) , являющихся условной границей выделенных клубней и поступающих на вход алгоритма; $ObjList$ – список объектов (ИД id и координат ограничивающих прямоугольников (x_1, y_1, x_2, y_2)), сгенерированный алгоритмом трекинга для предыдущего кадра; $\min(ObjList)$ ($\max(objList)$) обозначает, что из списка координат ограничивающих прямоугольников выбирается наименьшая координата левого нижнего угла прямоугольника (наибольшая координата правого нижнего угла). Регистрация

объекта обозначает присвоение ему нового ИД и включение его в список объектов, deregистрация – удаление объекта из списка объектов, соотнесение объектов означает присвоение объектам текущего кадра ИД, который выбираются из списка ИД объектов предыдущего кадра. Результат работы алгоритма трекинга объектов приведён на рис. 6.

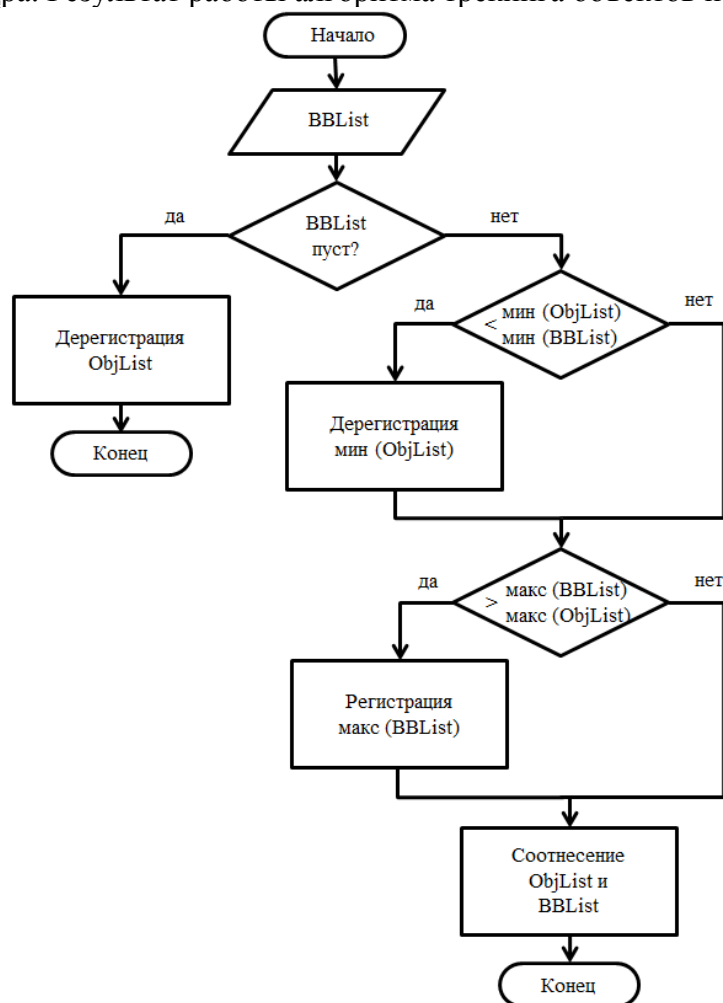


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма трекинга движущихся клубней картофеля

Источник: разработано авторами

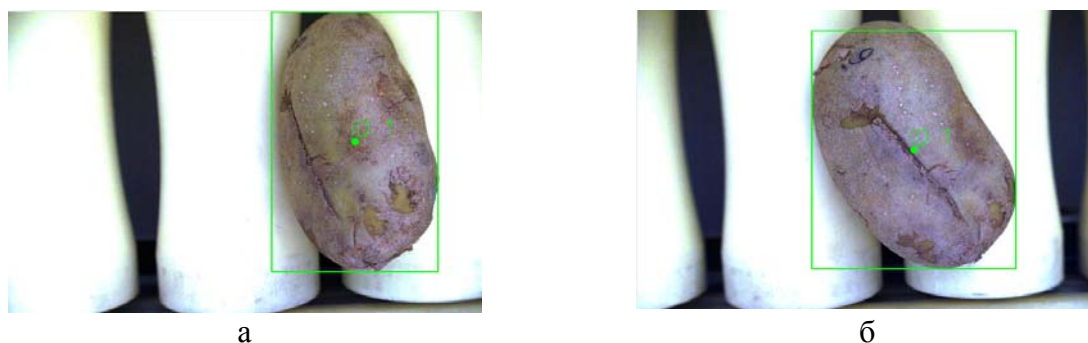


Рисунок 6 – Результат работы алгоритма трекинга объектов

Источник: разработано авторами

Алгоритм трекинга клубней картофеля обладает высокой скоростью работы, которая намного меньше скорости работы алгоритма сегментации.

Процесс классификации выделенного на конвейере картофеля реализован с помощью нейросетевого классификатора.

Принцип действия разработанного макетного образца автоматической сортировальной машины заключается в следующем.

Картофель, поступая на вальцовый подающий конвейер, перемещается в зону распознавания, где ему придается вращение посредством ременного привода. Клубни картофеля обрабатываются компьютерной программой. Идентифицированные клубни как некондиционные, перемещаясь вальцовым транспортирующим устройством к системе отделения, удаляются с вальцового конвейера струей сжатого воздуха. Неотделённые клубни продолжают движение по технологической линии. Время между моментом идентификации некондиционного клубня разрабатываемой системы распознавания и подачей последующего единичного сигнала для удаления задаётся, исходя из геометрических и скоростных характеристик вальцового подающего устройства.

Внешний вид макетного образца автоматической сортировальной машины представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Макетный образец автоматической сортировальной машины

Источник: разработано авторами

Проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить оптимальные параметры основных модулей макетного образца: рабочее давление в пневмосистеме 500 кПа, время открытия воздушного клапана 0,6 с, расстояние от сопла форсунки до середины вальца 80 мм, при этом точность сортирования составила 98 %.

Выводы. Разработан макетный образец автоматической сортировальной машины, в основу работы которого положена концепция интеллектуального анализа данных, согласно которой полученные с видеокамеры изображения клубней картофеля обрабатываются и

формируются в образы с последующим распознаванием и выдачей сигнала исполнительному устройству системы автоматической инспекции в виде единичного импульсного сигнала при определении клубня как некондиционного.

Список литературы

1. High speed potato grading and quality inspection based on a color vision system / J.C. Noordam, G.W. Otten, A.J.M. Timmermans, B.H. van Zwol. *Control Systems*. 2017. P. 15–24.
2. Совершенствование технологического процесса сортировки клубней картофеля по цветовой информации / Н.В. Бышов и др. *Научный журнал КубГАУ*. № 89 (05). 2013. С. 1–12.
3. Golmohammadi, A., Bejaei F., Behfar H. Design, Development and Evaluation of an Online Potato Sorting System Using Machine Vision. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. University of Tabriz, Tabriz, Iran. Vol 6 (7). P. 396–402.
4. Martelli, R. Image Analysis Implementation for Evaluation of External Potato Damage. *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 9. 2015. №. 81. P. 4029–4041.
5. Tavakoli, M., Mohsen N. Application of the Image Processing Technique for Sepa-rating Sprouted Potatoes in the Sorting Line. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*. 2015. Vol. 4(11S). P. 223–227.
6. Barnes, M., Cielniak G., Tom D. Minimalist AdaBoost for blemish identification in potatoes. *UK Journal of Food Engineering*. 2006. Vol. 78. P. 597–605.
7. Donggang, Hu. Potato shape detection based on stable direct least square method of ellipses fitting and it's application prospect in Land Science. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*. 2012. Vol. 6. P. 161–171.
8. Ahmed, M. Rady, Daniel E. Guyer. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes. *Computers and electronics in agriculture*. 2015. P. 31–48.
9. Fang, Tian, Yankun P., Wensong W. Nondestructive and rapid detection of potato black heart based on machine vision technology. *Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety*. VIII. V(2). China, 2016. P. 83–94.
10. Elbatawi, I.E. An acoustic impact method to detect hollow heart of potato tubers. *Biosystems engineering*. – Giza University. Egypt, 2008. P. 206–213.
11. Картофель свежий для переработки на продукты питания. Технические условия : ГОСТ 26832-86-2010. Введ. 06.01.1987. М. : Стандартинформ, 2010. 5 с.
12. Прокопович, Г.А. Разработка системы технического зрения для сервисного мобильного робота. *Третий всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»*, Иннополис, Республика Татарстан, 22–23 сентября 2015 г. / Ун-т Иннополис, редкол.: В.Е. Павловский [и др.]. Иннополис, 2016. С. 127–136.
13. Training deep face recognition systems with synthetic data / A. Kortylewski [et al.]. *Cornell University Library* [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>. (дата обращения: 16.04.2018).
14. Чигорин, А., Моисеев Б. Классификация автодорожных знаков на основе свёрточной нейросети, обученной на синтетических данных. *The 22nd International Conference on Computer Graphics and Vision*. Москва, Россия, 1–5 октября 2012 г. С. 284–287.

References

1. Noordam, J.C., Otten G.W., Timmermans, A.J.M., van Zwol, B.H. (2017). High speed potato grading and quality inspection based on a color vision system. *Control Systems*. 2017. P. 15–24. [in English].
2. Byshov N.V. et al. (2013). Sovershenstvovaniye tekhnologicheskogo protsessa sortirovki klubney kartofelya po tsvetovoy informatsii [Improvement of the technological process of sorting potato tubers by color information]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU – Scientific journal of KubSAU*, № 89 (05), 1–12. [in Russian].
3. Golmohammadi, A., Bejaei F., Behfar H. (2013). Design, Development and Evaluation of an Online Potato Sorting System Using Machine Vision. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. University of Tabriz, Tabriz, Iran. Vol 6 (7). P. 396–402. [in English].
4. Martelli, R.(2015). Image Analysis Implementation for Evaluation of External Potato Damage. *Applied Mathematical Sciences*. Vol. 9. №. 81. P. 4029–4041. [in English].

5. Tavakoli, M., Mohsen N. (2015). Application of the Image Processing Technique for Separating Sprouted Potatoes in the Sorting Line. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*. Vol. 4(11S). P. 223–227. [in English].
6. Barnes, M., Cielniak G., Tom D. (2006). Minimalist AdaBoost for blemish identification in potatoes. *UK Journal of Food Engineering*. Vol. 78. P. 597–605. [in English].
7. Donggang, Hu. (2012). Potato shape detection based on stable direct least square method of ellipses fitting and its application prospect in Land Science. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*. 2012. Vol. 6. P. 161–171. [in English].
8. Ahmed, M. Rady, Daniel E. Guyer. (2015). Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes. *Computers and electronics in agriculture*. P. 31–48. [in English].
9. Fang, Tian, Yankun P., Wensong W. (2016). Nondestructive and rapid detection of potato black heart based on machine vision technology. *Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety*. VIII. V(2). China, P. 83–94. [in English].
10. Elbatawi, I.E. (2008). An acoustic impact method to detect hollow heart of potato tubers. *Biosystems engineering*. Giza University. Egypt, P. 206–213. [in English].
11. Kartoffel' svezhiy dlya pererabotki na produkty pitaniya. Tekhnicheskiye usloviya [Fresh potatoes for processing into food. Specifications]. (2010). HOST 26832-86-2010 from 06 January 1987. Moscow : Standartinform [in Russian].
12. Prokopovich, G.A. (2016). Razrabotka sistemy tekhnicheskogo zreniya dlya servisnogo mobil'nogo robota [Development of a vision system for a service mobile robot]. *Tretiy vserossiyskiy nauchno-prakticheskiy seminar «Bespilotnyye transportnyye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta»*, Inno-polis, Respublika Tatarstan, 22–23 sentyabrya 2015 g. / Un-t Innopolis, redkol.: V.Ye. Pavlovskiy [et al.]. Innopolis, 2016. S. 127–136. [in Russian].
13. Kortylewski, A. [et al.] (2018). Training deep face recognition systems with synthetic data. *Cornell University Library*. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>. [in English].
14. Chigorin, A. & Moiseyev, B. (2012). Klassifikatsiya avtodorozhnykh znakov na osnove svortochnoy neyroseti, obuchennoy na sinteticheskikh dannykh [Classification of road signs based on a convolutional neural network trained on synthetic data]. *The 22nd International Conference on Computer Graphics and Vision*. Moskva, Rossiya, 1–5 oktyabrya 2012 g. S. 284–287. [in Russian].

Volodimir Vetokhin, Assoc. Prof., DSc.

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukrain,

Viktor Goldyban, PhD tech. sci., **M. Kurylovich**

RUE «SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization», Minsk, Republic of Belarus

Method and Device for Automatic Recognition of Unconditional Potato Tubes

The aim of the article is to improve the quality and productivity of sorting by developing a method and an intelligent device for automatic recognition and inspection of substandard potato tubers.

The article describes a prototype of an automatic sorting machine designed to recognize external defects in potato tubers and automatically inspect them with a jet of compressed air. The recognition process consisted of three main modules: segmentation, tracking a potato moving in a frame along a conveyor belt, and classification using a trained artificial neural network. For the segmentation of potato tubers against the background of the transporting conveyor in real time, a method based on the calculation of the color threshold was used. The centroid tracking algorithm was used to track moving potato tubers. To train the artificial neural network, we created our own dataset consisting of images of marketable and defective potato tubers.

A prototype of an automatic sorting machine has been developed, which is based on the concept of intelligent data analysis, according to which the images of potato tubers obtained from a video camera are processed and formed into images with subsequent recognition and signaling to the executive device of the automatic inspection system in the form of a single pulse signal when determining the tuber as substandard.

club potato, defect, automatic sorting, machine vision

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.206-218>**О.І. Субочев**, доц., канд. техн. наук, **Д.С. Білий**, студ.*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail subohev.alex@gmail.com***О.Є. Січко**, доц., канд. техн. наук*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail sae@ua.fm*

Підвищення ефективності функціонування виробничо-технічної бази сервісних підприємств

Запропоновано формування дробового факторного експерименту для побудови за допомогою методу регресійного аналізу лінійної залежності цільового функціонала від варійованих змінних.

Побудовано матрицю експерименту, яка полягає в моделюванні технологічного процесу сервісних підприємств, у визначенні варійованих змінних у всіх значеннях цільового функціонала. Для дослідження впливу рівня механізації на показники функціонування технічного обслуговування і ремонту необхідно визначити ступінь впливу механізації на трудомісткість ремонтних робіт.

Отримано результати обробки масиву даних спостережень з використанням кореляційно-регресійного аналізу. Перевірка моделей за критерієм Фішера показала, що найбільше наближення спостерігається при апроксимації наявних даних рівнянню регресії.

Встановлено, стосовно до штатного оснащення постів поточного ремонту особливої уваги і впровадження в практику виробництва заслуговують механізовані технологічні комплекси на спеціалізованих постах по заміні і поточному ремонту двигунів, агрегатів і вузлів ходової частини канавного типу і на підйомниках.

Одержано оптимальні значення досліджуваних факторів як для максимуму прибутку від виконання технічного обслуговування і ремонту автомобілів, так і для мінімуму часу перебування автомобілів у несправному стані.

сервісне підприємство, матриця експерименту, досліджувані фактори, оптимальні значення

А.И. Субочев, доц., канд. техн. наук, **Д.С. Билый**, студ.*Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, г. Днепр, Украина***А.Е. Сичко**, доц., канд. техн. наук*Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина*

Повышение эффективности функционирования производственно-технической базы сервисных предприятий

Предложено формирование дробного факторного эксперимента для построения с помощью метода регрессионного анализа линейной зависимости целевого функционала от варьируемых переменных.

Построено матрицу эксперимента, которая заключается в моделировании технологического процесса сервисных предприятий, в определении варьируемых переменных во всех значениях целевого функционала. Для исследования влияния уровня механизации на показатели функционирования технического обслуживания и ремонта необходимо определить степень влияние механизации на трудоемкость ремонтных работ.

Получены результаты обработки массива данных наблюдений с использованием корреляционно-регрессионного анализа. Проверка моделей по критерию Фишера показала, что наибольшее приближение получается при аппроксимации имеющихся данных уравнению регрессии.

Установлено, применительно к штатному оснащению постов текущего ремонта необходимы механизированные технологические комплексы на специализированных постах по замене и текущем ремонте двигателей, агрегатов и узлов ходовой части канавного типа и на подъемниках.

Получены оптимальные значения исследуемых факторов, как для максимума прибыли от производства технического обслуживания и ремонта автомобилей, так и для минимума времени пребывания автомобилей в неисправном состоянии.

сервисное предприятие, матрица эксперимента, исследуемые факторы, оптимальные значения

Постановка проблеми. Особливістю функціонування сервісних підприємств з технічного обслуговування і ремонту автомобілів (ТО і Р) на теперішній час в Україні є наявність підприємств різного розміру та форм власності, які використовують значну номенклатуру рухомого складу. Важливим питанням за цих умов є визначення оптимального способу організації сервісного виробництва у залежності від кількості одиниць рухомого складу (РС) та умов експлуатації [1].

Розробка розкладу постановки автомобілів на обслуговування і ремонт в сервісних підприємствах (СП) є багатоваріантною задачею. Кількість варіантів формується на множині вимог на обслуговування, робочих постів, персоналу відповідної кваліфікації, наявності потрібних запасних частин, пріоритетів та може досягати такого значення, що перевищує інтелектуальні можливості людини переглянути їх всі і знайти оптимальний варіант [2].

Потребує вирішення питання з погляду рівня насиченості потужностей автосервісу при існуючій щільності парку автомобілів на території. Інакше кажучи, який рівень потужності автосервісу є оптимальним для заданої кількості автомобілів. Адже, якщо потужностей автосервісу на певній території буде недостатньо, погіршиться рівень обслуговування клієнтів, а якщо будемо мати надлишки потужностей – погіршаться можливості для бізнесу [3].

Автосервіс – галузь, яка інтенсивно розвивається. Успіхи галузі обмежені, а недоліків на сьогодні забагато. Успіхи обумовлені зусиллями працюючих, а недоліки – об'єктивними чи суб'єктивними факторами. Ці фактори відображують – як в суспільстві в цілому, так і в автосервісі як складовій соціально-економічній системи суспільства, реальний стан та співвідношення кожного з факторів. В цілому складається ситуація, коли сукупність факторів та стан кожного з них скоріш є обмежуваними, а не таким, що сприяють розвитку автосервісу [4].

Постійне зростання автомобільного парку зумовило збільшення виробничих потужностей, тобто привело до збільшення кількості підприємств автосервісу. Одночасно збільшуються вимоги клієнтів. Тобто клієнти сервісних підприємств надають перевагу тим учасникам ринку, які пропонують необхідні послуги та забезпечують високу якість їх виконання, відповідно до світових стандартів [5].

В сучасних умовах не завжди є доцільним створювати на кожному сервісному підприємстві всю номенклатуру виробничих підрозділів з виконання усіх видів робіт з обслуговування та ремонту транспортних засобів. Це потребує значних капітальних вкладень та витрат, внаслідок чого збільшується собівартість перевезень та зменшується конкурентоспроможність підприємства на ринку транспортних і сервісних послуг [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В опублікованій літературі питання показників ефективності сервісних підприємств слабо висвітлені з тієї причини, що вони не є актуальними за умов розвитку СП як бізнесу без будь-якого аналізу його впливу на ефективність економіки чи соціального стану суспільства. В достатній мірі розроблені та висвітлені в літературі лише питання оцінки ефективності діяльності СП. Багато робіт присвячено конкурентоздатності бізнесу, залученню клієнтів та оцінці рівня їх задоволеності, витратам на діяльність автосервісу та забезпечення його прибутковості. Що ж стосується оцінки автосервісу як соціально-економічної системи та забезпечення його ефективності з погляду якості життя людей, то цьому питанню не приділяється належної уваги [7].

В Україні, незважаючи на економічні кризи спостерігається поступове збільшення обсягів перевезень пасажирів, експедиційних послуг і послуг у сфері ТО і Р АТЗ, які надаються організаціями, що спеціалізуються виключно на даних видах

діяльності. Зазначену ситуацію до певної міри можна розглядати як об'єктивний процес, що також відповідає загальній тенденції, яка в останні десятиліття простежується в світовій економіці – економічні організації різних галузей економіки прагнуть підвищити свою конкурентоспроможність, концентруючись на основному виді діяльності [8].

Досліджуючи досвід становлення і розвитку виробничих структур автомобільного транспорту, які забезпечують відповідні види діяльності, можна дійти висновку, що поєднання останніх не є єдино прийнятним. Значна частка виробничих структур автомобільного транспорту займається лише одним видом діяльності, передаючи інші до виконання стороннім суб'єктам господарювання. Разом з тим, ряд організацій поєднують ці види діяльності в певних об'єднаннях на умовах основних або допоміжних [1, 9].

Функції сучасних СП стали визначальними щодо можливих стратегічних напрямків його подальшого розвитку при переході до ринкових відносин. Структурні підрозділи СП, які опікувались основними та допоміжними видами діяльності, в багатьох випадках трансформувались в стратегічні бізнес-одиниці або самостійні спеціалізовані підприємства [10].

У результаті є звичайно значна незбалансованість між наявним парком автотранспортних засобів і потребою в його сервісному обслуговуванні за регіонами. Найбільша напруженість виникає в «молодих» окраїнних районах міста, де існує значна потреба в наявності автомобільного транспорту, що зв'язує периферійні території із центром, а приріст потужностей сервісного обслуговування традиційно відстає від цих потреб. У зв'язку із цим виникає завдання виявлення та подолання диспропорцій у розвитку міського автотранспортного господарства [11].

Постановка завдання. Метою даної роботи є підвищення ефективності роботи сервісних підприємства за рахунок багатопараметричної оптимізації залежності параметрів їх ефективності від факторів функціонування сервісного виробництва та встановлення довірчих інтервалів незалежних змінних.

Виклад основного матеріалу.

Алгоритм багатопараметричної оптимізації виробництва з технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Задачі оптимізації СМО з змішаними задачами з дискретними і безперервними змінними (до яких, зокрема, відноситься система технічного обслуговування і ремонту), є найбільш важкими для дослідження.

Метод Бокса-Уілсона – це метод оптимізації активного експерименту шляхом сходження параметрів оптимізації до оптимуму, суть якого полягає в наступному: рух у напрямі градієнта за наявності лінійного рівняння моделі здійснюється із центра експерименту послідовними кроками.

Метод Бокса-Уілсона [12] припускає формування дробового факторного експерименту (ДФЕ) для побудови за допомогою методу регресійного аналізу лінійної залежності цільового функціоналу від варійованих змінних.

Припустимо $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_n^{(1)}$ – значення варійованих змінних у точці $\bar{X}^{(1)}$ (у нашому випадку – параметри, що впливають на порядок вибірки на обслуговування): $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ – варіювання змінних. Виконаємо моделювання в кожній точці $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_n^{(1)} \pm \Delta X_i^{(1)}, \dots, X_n^{(1)}$, де $i = 1, 2, \dots, n$, що дає $2n$ значень цільового функціоналу. Матриця експерименту приведена в табл. 1.

Таким чином, моделювання виконується при почерговій зміні кожного варійованого параметра $\pm \Delta X$. У цьому полягає основна відмінність від методу Бокса-Уілсона, в якому матриця експерименту містить n рядків з причини використання ДФЕ.

Таблиця 1 – Матриця експерименту

№	X_1	X_2	X_3		X_n	C
1	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$		$X_n^{(1)}$	C_1
2	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$		$X_n^{(1)}$	C_2
...						
2n-1	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$		$X_n^{(1)} + \Delta X_n$	C_{2n-1}
2n	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$		$X_n^{(1)} - \Delta X_n$	C_{2n}

Джерело: розроблено авторами з використанням [12]

Те, що матриця експерименту містить $2n$ -рядків, обумовлює необхідність використання методів регресійного аналізу в повному обсязі для побудови рівняння лінійної регресії.

Гradient обчислюється за формулою

$$\text{grad}C = \frac{\partial C}{\partial X_1} \bar{l}_1 + \frac{\partial C}{\partial X_2} \bar{l}_2 + \dots + \frac{\partial C}{\partial X_n} \bar{l}_n, \quad (1)$$

де $\bar{l}_j, j = 1, n$ напрямний вектор координат осі X_j .

Для обчислення gradient за результатами моделювання буде залежність – лінійне рівняння регресії:

$$\hat{C} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_n \cdot X_n, \quad (2)$$

де $b_j, j = 0, n$ – коефіцієнти рівняння регресії;

$\hat{C}$ – розрахункове значення цільового функціонала.

Коефіцієнт рівняння регресії знаходимо методом найменших квадратів:

$$\sum_{i=1}^{2n} \left(C_i - b_0 - \sum_{j=1}^n b_j X_{ij} \right)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

Умови мінімального значення рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial b_j} \sum_{i=1}^{2n} \left(C_i - b_0 - \sum_{j=1}^n b_j X_{ij} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

Диференціюючи, одержуємо систему нормальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} N \cdot b_0 + b_1 \sum_{i=1}^{2n} X_{i1} + b_2 \sum_{i=1}^{2n} X_{i2} + \dots + b_n \sum_{i=1}^{2n} X_{in} = \sum_{i=1}^{2n} C_i, \\ b_0 \sum_{i=1}^{2n} X_{i1} + b_1 \sum_{i=1}^{2n} X_{i1}^2 + b_2 \sum_{i=1}^{2n} X_{i2} \cdot X_{i1} + \dots + b_n \sum_{i=1}^{2n} X_{in} \cdot X_{i1} = \sum_{i=1}^{2n} C_i \cdot X_{i1}, \\ b_0 \sum_{i=1}^{2n} X_{i2} + b_1 \sum_{i=1}^{2n} X_{i1} \cdot X_{i2} + b_2 \sum_{i=1}^{2n} X_{i2}^2 + \dots + b_n \sum_{i=1}^{2n} X_{in} \cdot X_{i2} = \sum_{i=1}^{2n} C_i \cdot X_{i2}, \\ \dots \dots \dots \\ b_0 \sum_{i=1}^{2n} X_{in} + b_1 \sum_{i=1}^{2n} X_{i1} \cdot X_{in} + b_2 \sum_{i=1}^{2n} X_{i2} \cdot X_{in} + \dots + b_n \sum_{i=1}^{2n} X_{in}^2 = \sum_{i=1}^{2n} C_i \cdot X_{in}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Для перевірки статичної значимості обчислюється розрахункове значення t – критерію Стюдента:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S \cdot b_j^2}, j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

де $S \cdot b_j^2$ – вибіркові дисперсії коефіцієнтів b_j , обчислених як добуток діагональних елементів матриці, зворотній матриці нормальної системи рівнянь, і квадратного кореня з дисперсії неадекватності цільового функціонала S_{ag}^2 , обчислюється за формулою:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{2n} (C_i - \hat{C}_i)^2}{(n-1)}. \quad (7)$$

Звертання матриці коефіцієнтів нормальної системи рівнянь (5) може бути виконане з використанням одного з чисельних методів, у даному випадку методу Гауса, що дає одночасно і значення визначника.

Якщо хоча б один коефіцієнт рівняння (2) для ($j \geq 1$) відмінний від нуля, здійснюється перехід до нової точки в просторі варійованих змінних $\vec{X}$ відповідно до алгоритму градієнтного пошуку.

Обчислюється модуль градієнта:

$$|gradC| = \sqrt{\sum_{j=1}^n b_j^2}. \quad (8)$$

Якщо $|gradC| = 0$, що має місце при статистичній значимості всіх коефіцієнтів рівняння регресії, тоді процедура пошуку припиняється. У іншому випадку робиться крок у зворотному напрямку градієнта:

$$X_j = X_j - \alpha \cdot b_j / |gradC|, \quad (9)$$

де α – параметр робочого кроку.

Оптимізація показників функціонування виробничих процесів сервісних підприємств з урахуванням ефективності. Для дослідження впливу рівня механізації на показники функціонування технічного обслуговування і ремонту необхідно визначити ступінь впливу механізації на трудомісткість ремонтних робіт [12].

У цьому випадку характерними показниками є:

- ступінь механізації:

$$C = \frac{T_m}{T_0} \cdot 100\%, \quad (10)$$

- рівень механізації, що оцінює пристосованість рухомого складу до застосування механізованого устаткування

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m z_i \cdot n_i}{z_{\max} \cdot N} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де T_m – сумарна трудомісткість механізованих операцій виробничого процесу, люд.-год.;

T_0 – загальна трудомісткість виробничого процесу, люд.-год.;

Z_i – ланковість устаткування, застосовуваного в i -тій операції;

n_i – кількість операцій з використанням устаткування ланки Z ;

$Z_{\max}$ – максимальна ланковість устаткування, $Z_{\max} = 4$;

N – загальна кількість операцій виробничого процесу.

Для найбільш представницьких моделей рухомого складу і застосовуваного в цих процесах устаткування ці показники визначаються:

- ступінь механізації

$$C_{\text{АТП}} = \frac{\sum_{j=1}^n C_{A_j} \cdot A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} = 100\%, \quad (12)$$

- рівень механізації:

$$Y_{\text{АТП}} = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j \cdot A_j}{\sum_{j=1}^n A_j} \cdot 100\%, \quad (13)$$

де C_{A_j} , Y_{A_j} – ступінь і рівень механізації по j -тому типу рухомого складу;

A_j – облікова кількість рухомого складу j -того типу.

Результати розрахунку, проведені для зони ПР ТОВ «Паритет-СП» м. Дніпро, наведені у табл. 2.

Отримані результати оброблялися з використанням кореляційно-регресійного аналізу. Перевірка моделей за критерієм Фішера показала, що найбільше наближення виходить при апроксимації наявних даних рівнянням регресії виду

$$y = a_0 + \frac{a_1}{x}, \quad (14)$$

де y – теоретичне значення відповідної залежної змінної – питомого показника;

a_0 , a_1 – коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3);

x – значення незалежної змінної – кількість робітників зони ПР в одну зміну.

Таблиця 2 – Результати розрахунку показників рівня механізації ТОВ «Паритет СП» м. Дніпро

Моделі автомобілів	Кількість механізованих операцій, од.	Загальна кількість операцій, од.	Трудомісткість механізованих операцій, люд-хв	Загальна трудомісткість, люд-хв	Ступінь механізації, %	Рівень механізації, %	В цілому по ТОВ «Паритет СП»	
							Ступінь механізації, %	Рівень механізації, %
ГАЗ	47	257	134,2	1549,2	8,6	6,9	9,6	10,5
ЗиЛ	55	293	194,7	1871,4	10,4	11,9		
КамАЗ	53	459	176,5	1944,5	9,1	7,3		
КрАЗ	43	429	183,5	2138,2	8,6	9,2		
МАЗ	60	436	195,4	1895,4	10,3	11,2		
Renault	95	682	287,9	2208,6	13,0	10,2		

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Залежність питомих показників механізації від потужності виробництва

Показники кореляційно-регресійного аналізу		Питома вартість технологічного устаткування					Питомі площі, м ² /люд	
		Універсальні пости при рівні механізації робіт ПР				Спеціалізовані пости	Спеціальні пости	Універсальні пости
		5	10	15	20			
Коефіцієнти рівняння регресії	a_0	422,3	1008,1	1676,0	2398,2	2042,3	68,7	77,3
	a_1	1443,8	3188,1	5273,0	7587,3	14921	225,4	244,4
Коефіцієнт кореляції		0,93	0,92	0,92	0,93	0,87	0,71	0,93

Джерело: розроблено авторами

Ефективне технологічне оснащення постів поточного ремонту передбачає впровадження засобів механізації, автоматизації і роботизації виробництва. У цьому зв'язку стосовно до штатного оснащення постів ПР особливої уваги і впровадження в практику виробництва заслуговують механізовані технологічні комплекси на спеціалізованих постах по заміні і поточному ремонту двигунів (ОН-280), агрегатів і вузлів ходової частини канавного типу (ОН-275, ОН-302) і на підйомниках (ОН-192А, ОН-192Б, ОН-269).

Пости моделей ОН-280, ОН-229, ОН-269 для заміни двигунів, зчеплення і коробки передач автомобілів ГАЗ, ЗИЛ і МАЗ створюються на оглядовій канаві зі стаціонарною естакадою висотою 600 мм, що забезпечує виконання робіт у трьох рівнях.

Високою продуктивністю, безпекою і задовільними умовами праці з заміни агрегатів має підлоговий стаціонарний пост моделі ОН-192. Вивішування автомобіля на посту виконується шестистояковим підйомником із двома поперечними балками.

Можливість переміщення розрізної балки забезпечує універсальність поста при поточному ремонті автомобілів різних моделей. Однак використання постів моделі ОН-192 для тривісних автомобілів пов'язано з підвищеною небезпекою виконання робіт у зв'язку з провисанням і перекосом заднього ходового візка. Їхнє застосування краще на універсальних робочих постах.

Підлоговий спеціальний пост моделі ОН-192 може впроваджуватися як замість канавного поста моделі ПУМ-1, так і в доповненні до нього. При використанні в сукупності з постом ПУМ-1 пост ОН-192 завантажувється, насамперед, тими роботами, на яких його продуктивність значно вище, а саме, по заміні коробок передач і зчеплення.

Спеціалізований пост моделі ОН-202 призначений для механізованої заміни переднього, середнього і заднього мостів, візка в зборі, редукторів ведучих мостів, коробок передач і зчеплення великовантажних автомобілів КамАЗ, КрАЗ, МАЗ. Цей пост монтується на тупиковій оглядовій канаві з манежною частиною. Основне устаткування поста включає бічні підйомники, П-подібну балку і самохідний візок. Бічні підйомники консольного типу мають хід на глибину канави і служать для опускання та підйому переднього, середнього і заднього мостів, а також знімального пристосування з надставкою для коробки передач чи роздавальної коробки при їхньому знятті й встановленні.

Визначення й аналіз показників виробничих процесів сервісних підприємств. Для груп факторів, визначених за результатами експертного опитування, визначалися залежності нижчеподаних критеріальних показників від досліджуваних факторів: прибутку від виконання технічного обслуговування і ремонту автомобілів та часу перебування автомобілів у несправному стані.

При аналізі аналітичних моделей, що описують процес функціонування сервісних підприємств, як позначення були прийняті [13]:

T – час перебування автомобілів у несправному стані;

Π – прибуток від виконання технічного обслуговування і ремонту автомобілів;

x_1 – рівень спеціалізації виробництва;

x_2 – рівень механізації виробництва;

x_3 – ступінь забезпеченості виробництва оборотним фондом агрегатів;

x_4 – ступінь використання технологічного устаткування;

x_5 – кваліфікація ремонтно-обслуговуючого персоналу.

Це дозволило представити зазначені моделі в наступному виді:

$$\begin{aligned} T &= a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5 \\ \Pi &= c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 + c_4 \cdot x_4 + c_5 \cdot x_5 \end{aligned} \quad (15)$$

Перевірка значимості коефіцієнта регресії в побудованих моделях (табл. 4) підтвердила вагомість кожного коефіцієнта регресії.

Отримане для кожної моделі значення коефіцієнта множинної кореляції (табл. 4) свідчить про досить тісний зв'язок між критеріальними показниками і всією сукупністю факторів.

Таблиця 4 – Перевірка математичних моделей на адекватність при рівні значимості

Річний обсяг робіт з ТО і ремонту автомобілів СП	Розрахункова величина критерію Фішера, $F_{\text{розр}}$	Таблична величина критерію Фішера, $F_{\text{табл}}$	Коефіцієнт множинної кореляції, R
Моделі дослідження часу перебування автомобілів у несправному стані			
	10,540	5,81	0,951
Моделі дослідження прибутку від виконання ТО і Р автомобілів			
	16,515	5,81	0,969

Джерело: розроблено авторами

Принциповою, відмінною рисою отриманих залежностей (рис. 1 – рис. 4) є те, що кожна із залежностей, що описує вплив окремого фактору на критерій ефективності, отримана при спільному впливі інших п'яти факторів.

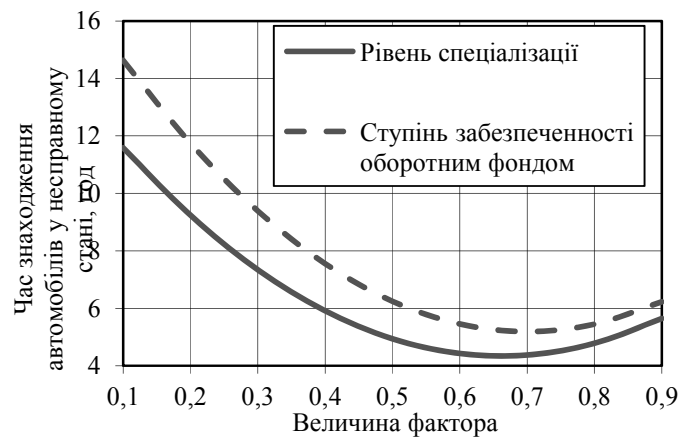


Рисунок 1 – Зміна часу знаходження автомобілів у несправному стані в залежності від рівня спеціалізації та ступеня забезпеченості оборотним фондом

Джерело: розроблено авторами

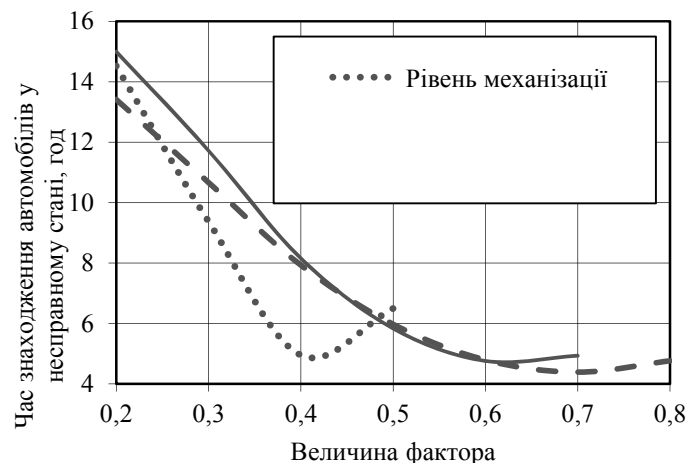


Рисунок 2 – Зміна часу знаходження автомобілів у несправному стані в залежності від рівня механізації, продуктивності ремонтно-обслуговуючого персоналу та ступеня використання технологічного обладнання

Джерело: розроблено авторами

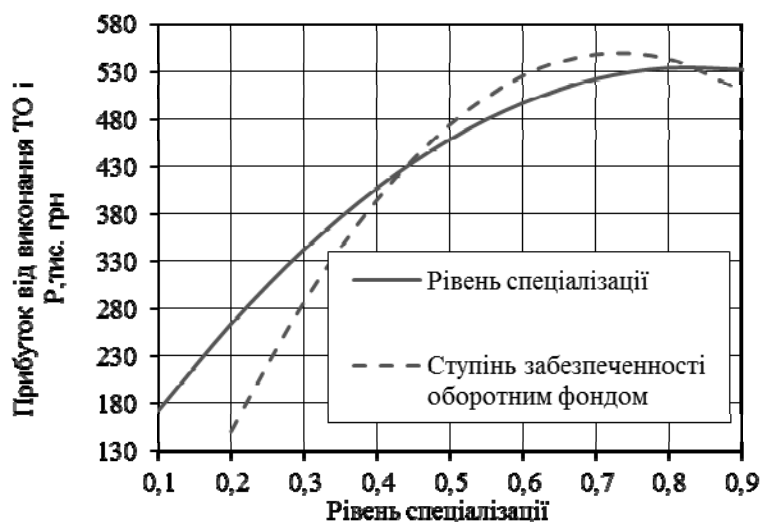


Рисунок 3 – Зміна прибутку від виконання ТО і Р в залежності від рівня спеціалізації та ступеня забезпеченості оборотним фондом

Джерело: розроблено авторами

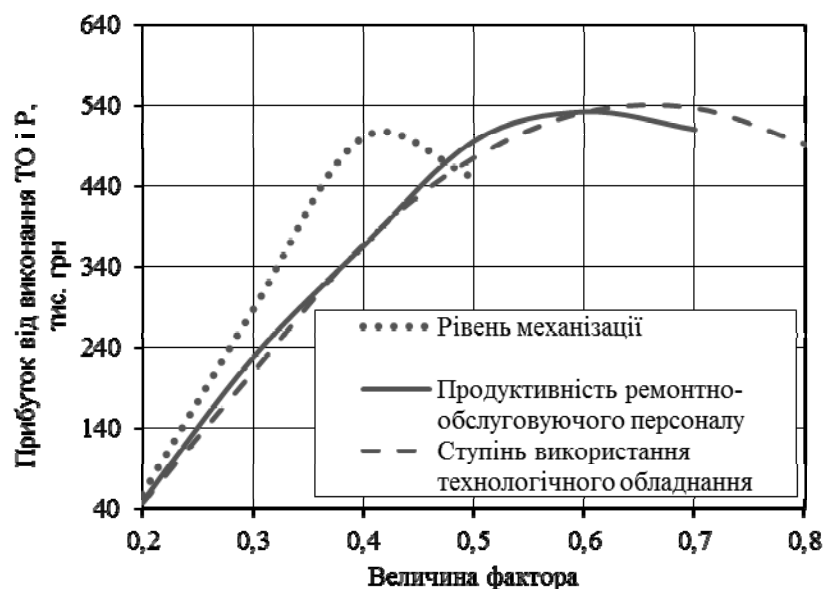


Рисунок 4 – Зміна прибутку від виконання ТО і Р в залежності від рівня механізації, продуктивності ремонтно-обслуговуючого персоналу та ступеня використання технологічного обладнання

Джерело: розроблено авторами

Оптимальні значення розглянутих факторів (табл. 5) відповідають тим точкам, у яких:

- 1 - час знаходження автомобілів в несправному стані приймає мінімальні значення;
- 2 - прибуток від виконання ТО і ремонту автомобілів приймає максимальні значення.

Таблиця 5 – Оптимальні значення факторів, які визначають ефективність виробництва сервісних підприємств

Фактори	Чисельне значення інтервалу фактору
При мінімумі часу знаходження автомобілів в несправному стані	
- ступінь спеціалізації	0,55-0,75
- рівень механізації	0,49-0,58
- ступінь забезпеченості оборотним фондом	0,61-0,78
- продуктивність ремонтно-обслуговуючого персоналу	0,78-0,89
- ступінь використання технологічного обладнання	0,62-0,79
При максимумі прибутку від виконання ТО і ремонту автомобілів	
- ступінь спеціалізації	0,75-0,90
- рівень механізації	0,51-0,61
- ступінь забезпеченості оборотним фондом	0,62-0,80
- продуктивність ремонтно-обслуговуючого персоналу	0,78-0,88
- ступінь використання технологічного обладнання	0,58-0,74

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи апроксимуючі залежності впливу факторів на параметри ефективності виконання технічного обслуговування і ремонту автомобілів випливає, що параметри ефективності поліпшуються не на всьому діапазоні фактору, а до визначеної межі величини (табл. 5).

Висновки. Розроблена економіко-математична модель багатопараметричної оптимізації виробничих процесів технічного обслуговування і ремонту автомобілів дозволяє враховувати пріоритети при перевезеннях і обслуговуванні, вибрати раціональні значення показників роботи технічної служби сервісних підприємств, максимально задовольняти клієнтів у послугах з технічного обслуговування і ремонту автомобілів.

Досліджено вплив раніше обґрунтованих виробничих факторів таких як: рівня спеціалізації і механізації, ступеня забезпеченості оборотним фондом і використання технологічного устаткування, продуктивності праці ремонтно-обслуговуючого персоналу на показники ефективності функціонування виробничих процесів технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів.

Інтенсивність зміни параметрів ефективності таких як: часу перебування автомобілів у несправному стані, прибутку від виконання ТО і ремонту від виробничих факторів зменшується зі збільшенням обсягу робіт з технічного обслуговування і ремонту автомобілів.

Збільшення параметрів ефективності виробничих процесів технічного обслуговування і ремонту автомобілів спостерігається не у всьому діапазоні зміни факторів, а до визначеної величини.

Список літератури

1. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Організація технічної експлуатації автомобілів в Україні за сучасних умов. *Вісник НТУ: Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник*. Вип. 1 (34). К.: НТУ, 2016. С. 12-20.
2. Березняцький В.В. Оптимізація часу простою автомобілів у ремонті і обслуговуванні за рахунок удосконалення оперативного планування виконання цих робіт. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2016. Вип. 1 (34). С. 56-59.

3. Оптимізація виробничої структури автосервісу / О.Д. Марков, А.В. Ковальов, А.П. Скиба., О.О. Приз. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2016. Вип. 1 (34). С. 247-254.
4. Марков О.Д. Фактори розвитку автосервісу. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2018. Вип. 1 (40). С. 203-214.
5. Тарандушка Л.А., Яновський В.В. Ранжування номенклатури послуг для автосервісних підприємств. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»*. Київ: НТУ, 2018. Вип. 3 (42). С. 146 – 153.
6. Савін Ю.Х., Митко М.В. Доцільність створення виробничих підрозділів з обслуговування та ремонту автомобілів. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2016. Вип. 1 (34). С. 424-429.
7. Марков О.Д., Веретельникова Н. В. Обслуговування клієнтів автосервісу: навчальний посібник. К.: Видавництво Каравела, 2015. 263 с.
8. Марков О.Д., Рудковський О.С., Лемешинський С.М. Проблеми управління підприємствами. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2015. № 2(223).
9. Сахно В. П., Свостін-Косяк Д.О. Форми організації моніторингу технічного стану транспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2017. Вип. 37. С. 373-380.
10. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу: монографія. К.: Кафедра, 2014. 328 с.
11. Лудченко О.А., Лудченко Я.О., Чередник В.В. Управління якістю технічного обслуговування автомобілів: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / за ред. О.А. Лудченка. К.: Ун-т "Україна", 2012. 327 с.
12. Субочев О.І. Підвищення ефективності автосервісних підприємств на основі пріоритетів транспортного процесу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / О.І. Субочев. Київ, 2001. 20, [1] с.
13. Погорелов М.Г., Ларін О.М., Субочев О.І. Оптимізація показників функціонування автосервісних підприємств з урахуванням факторів пріоритетності. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. СХУ ім. Володимира Даля. Луганськ, 2011. № 6(120). С. 78 – 84.

Referencis

1. Andrusenko, S.I. & Bugajchuk, O.S. (2016). Organizaciya tekhnichnoi ekspluatacii avtomobiliv v Ukraïni za suchasnih umov. [Organization of technical exploitation of automobiles in Ukraine for crazy minds]. *Visnik NTU. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Kyiv: NTU, Vol. 1 (34), 12-20 [in Ukrainian].
2. Bereznjac'hij, V.V. (2016). Optimizaciya chasu prostoyu avtomobiliv u remonti i obslugovuvanni za rahunok udoskonalennya operativnogo planuvannya vikonannya cih robit. [Optimization of the downtime of cars for repairs and maintenance for repairs. Improved operational plan]. *Visnik NTU. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Kyiv: NTU, Vol. 1 (34). 56-59. [in Ukrainian]
3. Markov O.D., Koval'ov A.P., Skiba., O.O. (2016) Optimizaciya virobничої структури avtoservisu [Optimization of production avtoservis]. *Visnik NTU. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Kyiv: NTU, Vol. 1 (34). 247-254 [in Ukrainian].
4. Markov, O.D. (2018). Faktori rozvitku avtoservisu. [Development factor for car service] *Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Kyiv : NTU, Vol. 1 (40), 203-214 [in Ukrainian].
5. Tarandushka, L.A. & Yanovs'kij, V.V. (2018). Ranzhuvannya nomenklatury poslug dlya avtoservisnih pidpriemstv [Ranking of the nomenclature of services for car service enterprises]. *Visnik NTU. Seriya «Tekhnichni nauki»*. Kyiv: NTU, Vol. 3 (42), 146 – 153 [in Ukrainian].
6. Savin, Y.H. & Mitko, M.V. (2016). Docil'nist' stvorenniya virobничih pidrozdiliv z obslugovuvannya ta remontu avtomobiliv. [Associativity in the field of robberies for servicing and repair of cars]. *Visnik NTU. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik*. Kyiv: NTU, Vol. 1 (34), 424-429 [in Ukrainian].
7. Markov, O.D. & Veretel'nikova, N.V. (2015). Obslugovuvannya klientiv avtoservisu. [Servicing a car repair service]. Kyiv: Vidavnictvo Karavela [in Ukrainian].
8. Markov, O.D. & Rudkovs'kij, S.M (2015). Problemi upravlinnya pidpriemstvami avtoservisu. [Problems of car service management]. *Lemeshins'kij Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu.: Tekhnichni nauki*. Vol. 2(223). [in Ukrainian].
9. Sahno, V. P. & Svostin-Kosyak, D.O. (2017). Formi organizacii monitoringu tekhnichnogo stanu transportnih zasobiv. [Form the organization of monitoring the technical camp of transport concerns].

- Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauki». Naukovo-tekhnichnij zbirnik.* Kyiv: NTU. Vol. 37, 373-380. [in Ukrainian].
10. Andrusenko, S.I. & Bugajchuk, O. S. (2014). Modelyuvannya biznes-procesiv pidpriemstva avtoservisu [Model of business processes for car service]. Kyiv: Kafedra [in Ukrainian].
 11. Ludchenko, O.A., Ludchenko, YA.O. & CHerednik, V.V. (2012). Upravlinnya yakistyu tekhnichnogo obslugovuvannya avtomobiliv: navch. posib. dlya stud. vishch. navch. zakl. za red. O.A. Ludchenka. Kyiv : Un-t "Ukraina" [in Ukrainian].
 12. Subochev, O.I. (2001). Pidvishchennya efektyvnosti avtoservisnih pidpriemstv na osnovi prioritetiv transportnogo procesu. [Efficiency improvement of vehicle care enterprises on the transport process priorities basis]: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. nekhn. nauk : Spec. 05.22.20 «Tkspluatsiya ta remont zasobiv transportu». Kiiv [in Ukrainian].
 13. Pogorelov, M.G., Larin, O.M. & Subochev, O.I. (2011). Optimizaciya pokaznikov funkcionuvannya avtoservisnih pidpriemstv z urahuvannyam faktoriv prioritetnosti. [Optimization of performance indicators of car service enterprises taking into account priority factors]. *Visnik Skhidnoukraiïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya, SNU im. Volodimira Dalya.* Lugans'k, Vol. 6(120). 78 – 84 [in Ukrainian].

Olexander Subochev, Assoc. Prof., PhD in Tech. Sciences, **Denis Biliy**, student
Dnipro State University of Agriculture and Economics, Dnipro, Ukraine

Olexander Sichko, Assoc. Prof., PhD in Tech. Sciences
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Improving the Efficiency of the Production and Technical Base of Service Enterprises

The formation of a fractional factorial experiment for construction using the method of regression analysis of the linear dependence of the target functional on the variables is proposed. The tasks of optimizing queuing systems with discrete variables and mixed tasks with discrete and continuous variables (which, in particular, includes the system of maintenance and repair of machines) are the most difficult.

An experimental matrix is constructed, which consists in modeling the technological process of service enterprises, determining the variables in all values of the objective functional. The matrix of the experiment contains a significant number of lines, necessitates the use of regression analysis in full amount to construct a linear regression equation. The inversion of the coefficients matrix of the equations normal system is solved using the numerical Gaussian method, which also gives the value of the determinant.

It is proposed to study the influence of the level of mechanization on the performance of maintenance and repair, it is necessary to determine the degree of influence of mechanization on the complexity of repair work.

The degree and level of technological processes mechanization of maintenance and repair for each type of car and in general for the existing cargo service enterprise is calculated.

The processing extensive evidence effect using correlation-regression analysis is obtained. Evaluation models by Fisher's criterion showed that the greatest approximation is obtained by approximating the available data by the regression equation.

It is established that the effective technological equipment of current repair posts involves the introduction of mechanization, automation and robotics of production. In this regard, in relation to the standard equipment of current repair stations special attention and implementation in production practice deserve mechanized technological complexes at specialized posts for replacement and current repair of engines, units and units of the chassis of the ditch type and lifts.

The dependences of the criterion indicators of profit from the production of maintenance and repair of cars and the cars stay time in defective condition from the studied factors are determined. The principal distinguishing feature of the obtained dependences is that each of the dependences describing the influence of a single factor on the criterion of efficiency is obtained under the combined influence of the other five factors.

The optimal values of the studied factors are obtained, both for the maximum profit from the production of maintenance and repair of cars and for the minimum time of the cars in a faulty condition. Analyzing the approximate dependences of the influence of factors on the parameters of the efficiency of maintenance and repair of cars, it follows that the efficiency parameters do not improve over the entire range of the factor, but to a certain value.

service enterprise, experiment matrix, investigated factors, optimal value

Одержано (Received) 09.09.2020

Прорецензовано (Reviewed) 24.09.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 621.3.019.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.219-229>

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: swckntu@gmail.com

Архітектура адаптивної бездротової локальної мережі для управління об'єктами і пристроями

Наведено опис архітектури адаптивної бездротової локальної мережі, розробленої для управління технологічними процесами, робототехнічними пристроями та іншими об'єктами. Описана концепція роботи бездротової мережі. Бездротова мережа є адаптивною, що самоорганізується і здатна працювати автономно. Розроблено протокол бездротової мережі для управління обміну даними і конфігурації мережі. Управління мережею і взаємодія контролерів вузлів мережі між собою здійснюється за допомогою різних трансиверів, що дозволило розподілити службовий трафік і трафік даних по різних каналах. Бездротова мережа може використовувати як локальний, так і хмарний MQTT сервер.

бездротова мережа, архітектура, протокол, контролер, об'єкт, вузол мережі, кластер

В.В. Смирнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смирнова**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Архитектура адаптивной беспроводной локальной сети для управления объектами и устройствами

Приведено описание архитектуры адаптивной беспроводной локальной сети разработанной для управления технологическими процессами, робототехнических устройств и другими объектами. Описана концепция работы беспроводной сети. Беспроводная сеть является адаптивной, самоорганизующейся и способна работать автономно. Разработан протокол беспроводной сети для управления обмена данными и конфигурирования сети. Управление сетью и взаимодействие контроллеров узлов сети между собой осуществляется с помощью разных трансиверов, что позволило распределить служебный трафик и трафик данных по разным каналам. Беспроводная сеть может использовать как локальный, так и облачный MQTT сервер.

беспроводная сеть, архитектура, протокол, контроллер, объект, узел сети, кластер

Постановка проблеми. В даний час існує безліч локальних бездротових мереж різної архітектури, які використовуються для управління технологічними процесами, робототехнічними пристроями та іншими об'єктами.

Область застосування бездротових локальних мереж широка, проте іноді існують обмеження на параметри технічного обладнання, яке може бути використане в певних умовах, наприклад, у вибухо- і пожежонебезпечних виробництвах.

Існуючі реалізації архітектур і технічних рішень локальних бездротових мереж не завжди оптимальні як з точки зору використовуваних протоколів, так і з точки зору економічної ефективності конкретної технології.

Наприклад, для систем «Розумний будинок» і подібних малих систем існує велика кількість варіантів реалізацій, які в певних умовах перестають виконувати свої функції.

Одним з таких умов є зміна топології мережі, в результаті якого окремі об'єкти мережі перестають бути доступними для сервера та інших об'єктів мережі.

Таким чином, мережа повинна бути адаптованою до зміни своєї топології, бути здатною до відновлення втрачених зв'язків між об'єктами мережі і до встановлення нових зв'язків і маршрутів обміну даними.

Найважливішим фактором, що визначає «живучість» мережі є її архітектура. Наприклад, мережа з архітектурою «Клієнт-Сервер» при відмові сервера перестає існувати. Тому для забезпечення працездатності мережі необхідно розподілити функції управління мережею між декількома або всіма об'єктами мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує ряд стандартів на мережеві протоколи для бездротових мереж відповідно до яких реалізуються різні мережеві технології.

Мережеві стандарти IEEE 802.11 реалізується технологією Wi-Fi [1,2].

Мережа на основі Wi-Fi працює в діапазонах 2,4 і 5 ГГц. Забезпечуючи високу пропускну здатність, технологія має ряд недоліків, що перешкоджають побудові мобільної мережі для управління роєм об'єктів, а саме: обмежена кількість одночасних з'єднань (10-50 в залежності від застосовуваного контролера), великий час встановлення з'єднання (до 10 секунд) і відносно великий струм споживання.

Мережевий стандарт IEEE 802.15.4 реалізується технологією ZigBee для маршрутизованих радіомереж. Розроблено групою ZigBee Alliance [3-6].

Стандарт визначає два типи вузлів мережі: повнофункціональний пристрій Full-Function Device (FFD) і пристрої з полегшеними функціями Reduced-Function Device (RFD). Пристрій FFD є координатором мережі і може виконувати функції загального вузла. Пристрій RFD є простим пристроєм і не може виконувати функції координатора.

Мережа на основі ZigBee може бути одноранговою з топологією peer-to-peer (P2P), або мати топологію «зірка». Мережа повинна мінімум один FFD.

Мережі P2P можуть створювати довільні структури з'єднань і є основою для мереж, здатних до самоврядування і організації. Однак ZigBee не реалізує ці функції, що є перешкодою для застосування технології ZigBee в мобільній мережі для управління роєм об'єктів.

Мережа Z-Wave на основі ITU-T G.9959 [7-8] дозволяє створювати комірчасті мережі, що самоорганізуються і є гарним рішенням для управління роєм об'єктів. Однак, для створення контролерів мережі необхідно мати сертифікат союзу Z-Wave Alliance на правах члена Full Member за \$ 2500 на рік, що перешкоджає широкому використанню Z-Wave для реалізації мобільної мережі з аморфною топологією.

Мережевий стандарт IEEE 802.16 реалізується технологією WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [9-10]. У цій технології реалізується концепція множинного доступу з поділом за часом (TDMA). Базова станція виділяє абонентським станціям тимчасові інтервали, для передачі даних в строгій черговості, що виключає колізії в середовищі передачі.

Однак, технологія вимагає використання базових станцій, абонентських станцій і устаткування для організації зв'язку між базовими станціями, що не відповідає концепції створення недорогої локальної мережі.

Реалізація бездротової мобільної мережі для управління роєм об'єктів досить ефективна, але для простої стаціонарної мережі є надмірною [11]. Однак архітектура мережі, контролера вузла мережі і система протоколів може бути взята за основу при створенні адаптивної бездротової локальної мережі для управління об'єктами і пристроями.

Постановка задачі. Для управління обладнанням, об'єктами і пристроями під керуванням локальної / глобальної мережі а також в технології Internet of Things (IOT) використовується MQTT сервер (брокер), який реалізує протокол Message Queue

Telemetry Transport [12] також стандартизований OASIS [13]. MQTT сервер, може бути як глобальним, як наприклад, HiveMQ [14] і розміщуватися в хмарі, так і локальним, таким як Eclipse Mosquitto [15] і багато інших.

MQTT протокол публікації / підписки (publish / subscribe) забезпечує масштабований і відносно надійний спосіб підключення об'єктів і пристроїв через Інтернет і локальні мережі. MQTT протокол простий, досить ефективний і не вимагає великих обчислювальних ресурсів. Його перевагою є можливість роботи в ненадійних мережах.

Однак працездатність MQTT взаємодії безпосередньо залежить від властивостей мережі, яка не завжди може забезпечити доступ об'єктів мережі до MQTT сервера.

Тому представляється доцільною розробка адаптивної бездротової локальної мережі з невисокою вартістю і обмеженою функціональністю для управління технологічним обладнанням, об'єктами і пристроями, в рамках реалізації технології IOT без використання сервера MQTT.

Зокрема, така мережа може бути використана в системах «Розумний будинок», у вибухо- і пожежонебезпечних виробництвах, складах, елеваторах і в інших об'єктах.

Основним завданням адаптивної локальної мережі є реалізація взаємодії об'єктів мережі між собою в умовах зміни топології мережі. Мережа повинна забезпечити функціонування всіх об'єктів мережі при будь-якій зміні топології, бути такою, що самоорганізується, адаптованою і здатною до роботи без MQTT сервера.

Для вирішення цього завдання необхідна розробка архітектури мережі, стека протоколів, стратегії поведінки мережі та створення програмного забезпечення контролера вузла мережі.

Виклад основного матеріалу. У локальних бездротових мережах широко використовується технологія Wi-Fi, яка дозволяє досить простими засобами створити архітектуру «Клієнт-Сервер». Функції Клієнта виконують вузли Wi-Fi мережі з конфігурацією Station (рис. 1 а)), а функції сервера - вузол з конфігурацією Access Point (точка доступу). Обмін інформацією між вузлами мережі здійснюється поверх Wi-Fi протоколів за допомогою протоколів MQTT через MQTT сервер (рис. 1 б)).

Така архітектура мережі має два недоліки. Один полягає в тому, що при відмові або недоступності MQTT сервера вся мережа стає непрацездатною, а об'єкти мережі - некерованими. Другий недолік полягає в тому, що при зміні положення об'єкта мережі в просторі, об'єкт може втратити зв'язок з точкою доступу і також стати некерованим (рис 1 а), б)).

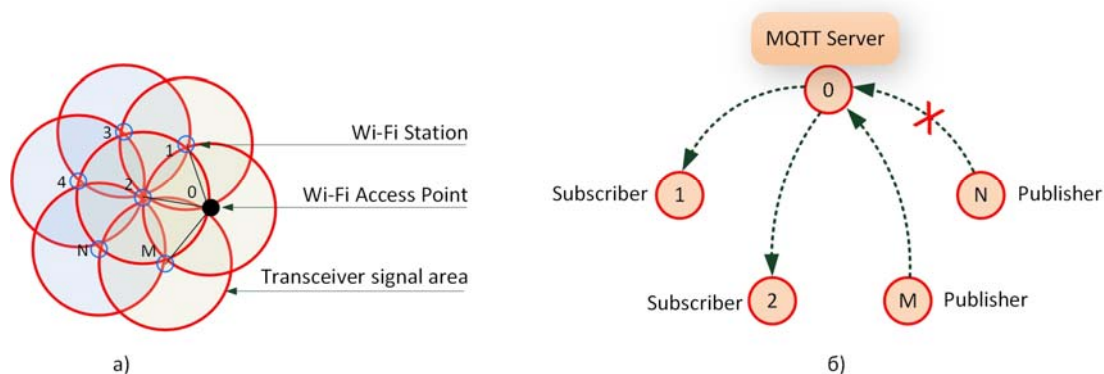


Рисунок 1 – Архітектура «Клієнт-Сервер» з використанням MQTT сервера

Джерело: розроблено авторами

Зазначені недоліки усуваються шляхом об'єднання вузлів мережі в комірчасту мережу (Mesh network), в якій всі вузли мережі мають кілька зв'язків з іншими доступними вузлами мережі (рис. 2 а)). У цьому випадку обмін інформацією між вузлами мережі здійснюється не тільки через MQTT сервер, але і через прямі зв'язки між вузлами мережі (рис. 2 б)), які виконують функції ретрансляторів.

При такій організації мережі MQTT сервер стає необов'язковим атрибутом в локальній мережевій системі управління об'єктами.

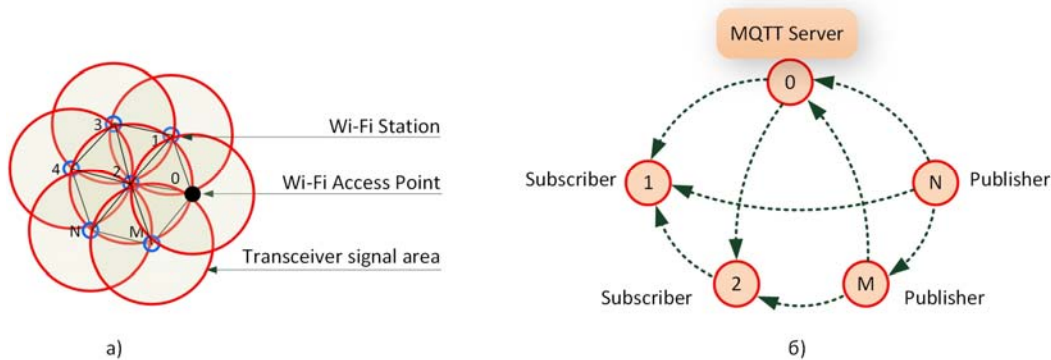


Рисунок 2 – Mesh-Network с использованием MQTT сервера

Джерело: розроблено авторами

В реальних умовах топологія мережі може включати в себе безліч вузлів-ретрансляторів і бути неоптимальною з погляду керованості. Динамічне розбиття мережі на кластери сприяє підвищенню рівня керованості мережі та її адміністрування.

З урахуванням вищевикладеного була створена архітектура адаптивної бездротової локальної мережі з можливістю динамічної зміни топології мережі що не приводить до втрати її керованості (рис. 3).

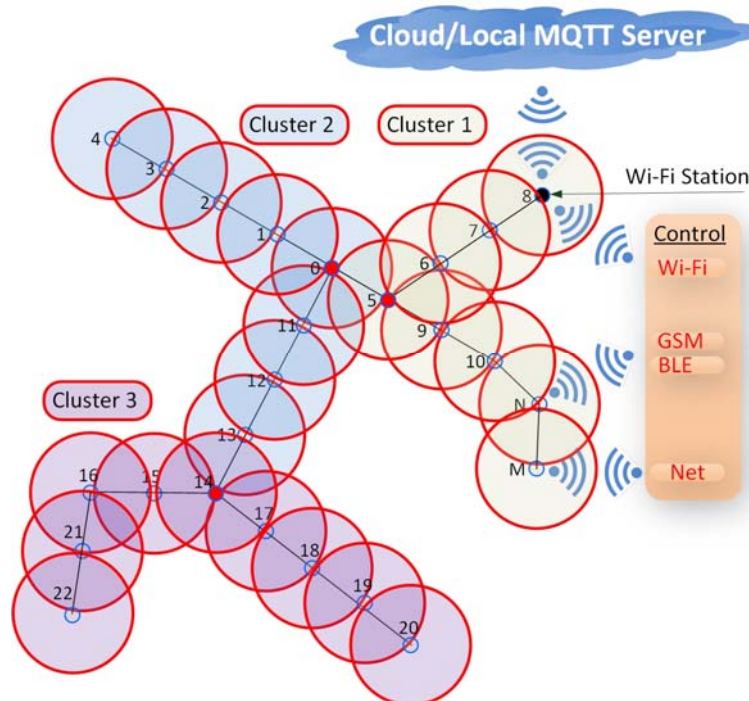


Рисунок 3 – Архітектура адаптивної бездротової локальної мережі

Джерело: розроблено авторами

Більшою мірою архітектура адаптивної бездротової локальної мережі включає в себе перевірені рішення інших архітектур, які доповнені апаратними та програмними засобами, необхідними для виконання мережею заданих функцій.

Критичною ситуацією в мережі може бути послідовність вузлів-ретрансляторів зі зв'язками «один до одного». При відключенні одного вузла-ретранслятора в ланцюжку всі інші вузли також будуть відключені. Для усунення такої ситуації в мережу необхідно включити додаткові вузли-ретранслятори для створення зв'язків «один до багатьох» або «багато до багатьох». З огляду на невисоку вартість контролера мережі, формування надійної топології мережі не становить проблеми.

Вузли Wi-Fi мережі використовують постійно включені передавачі, що при великій кількості вузлів створює небезпечний для людини рівень СВЧ-випромінювання. У системах «Розумний будинок» несприятливий вплив випромінювання Wi-Fi великої кількості передавачів негативно позначається на стан здоров'я мешканців будинку.

Підвищене споживання електроенергії від джерела живлення (до 300 мА) також є небажаним фактором для Wi-Fi об'єктів мережі, що мають автономне джерело живлення.

Використання технології Wi-Fi для побудови мережі з невеликим обсягом переданої інформації не є оптимальним рішенням, тому кількість Wi-Fi вузлів мережі обмежена необхідним мінімумом.

Управління мережею здійснюється за допомогою Wi-Fi, GSM, Bluetooth (BLE) трансиверів. Трансивер UART 2.4 GHz є основним засобом комунікації між вузлами локальної мережі. Wi-Fi точка доступу належить вузлу мережі з функціями управління для забезпечення зв'язку з хмарним MQTT сервером і з комп'ютером адміністратора мережі.

При запуску мережі або виявленні зміни топології мережі запускається процедура реконфігурації, в процесі виконання якої оновлюються таблиці зв'язків з доступними вузлами мережі. Найближчий вузол може виступати в ролі ретранслятора.

Обмін даними конфігурації між вузлами мережі здійснюється через заданий інтервал 1-30 сек. Вузол мобільної мережі передає дані про свій стан в широкомовному режимі.

Той вузол, у якого більше сусідніх зв'язків, створює кластер і стає координатором кластера (рис. 3). З безлічі контролерів вузлів мережі кластера зі зв'язками одного рангу координатором стає контролер з більшою адресою (ідентифікатором).

У мережі використовується модифікований метод доступу до середовища передачі CSMA / CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій). Колізія вирішується шляхом повторної передачі пакета вузлом з урахуванням пріоритету.

Пріоритет має вузол мережі з меншим номером (значенням ідентифікатора), оскільки час тайм-ауту при вирішенні колізії спочатку різний і збільшується пропорційно номеру вузла мережі. Як тільки мережа звільняється, вузол, який бере участь в колізії повторно ініціює передачу даних. Інформація про виникнення колізії передається всім вузлам мережі, тому наступний інформаційний обмін не може початися раніше, ніж завершиться попередній.

Для реалізації поставленого завдання був розроблений контролер вузла адаптивної бездротової мережі.

Архітектура контролера вузла мережі і взаємодія контролера з об'єктом мережі представлена на рис. 4.

Контролер вузла мережі може мати різну конфігурацію, яка визначає його роль в локальній мережі. Контролер вузла мережі може бути як керуючим, так і ординарним. Керуючий контролер забезпечує взаємодію із зовнішньою системою управління і з простими контролерами мережі. Керуючих контролерів в мережі може бути кілька.

Ординарний контролер відрізняється від керуючого відсутністю Wi-Fi і GSM трансиверів і містить тільки UART 2.4 GHz трансивер для забезпечення мережевої взаємодії і BLE трансивер (опціонально) для управління мережею через смартфон.

Тому ієрархія контролера в мережі визначається тільки його конфігурацією. Застосування декількох трансиверів дозволяє розвантажити середу передачі від зайвого трафіку. Трансивери працюють на різних каналах і з різною інтенсивністю, тому не мають негативного взаємного впливу.

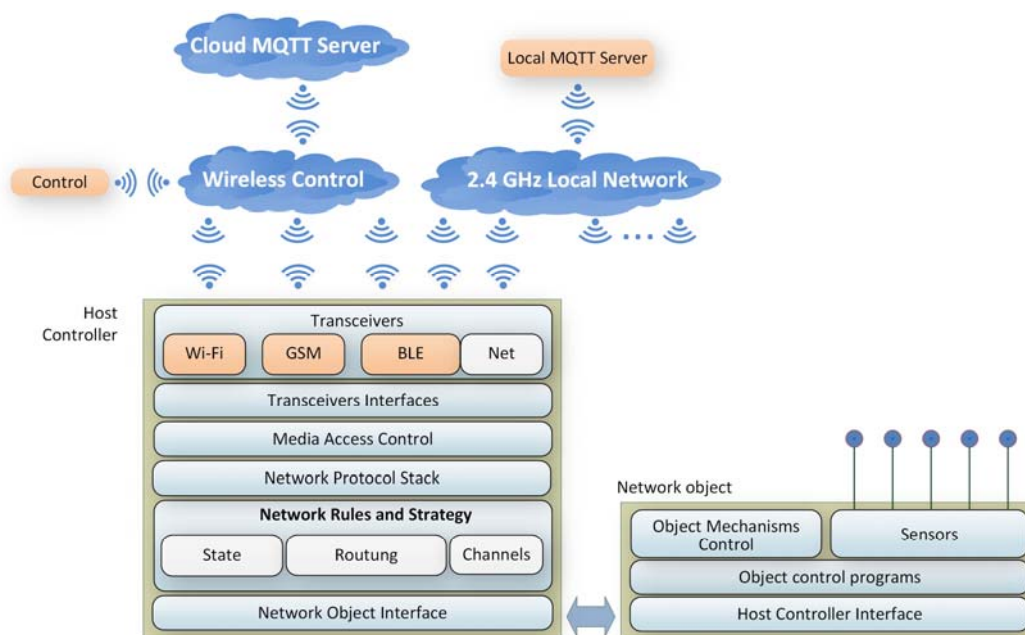


Рисунок 4 – Архітектура контролера вузла мережі і взаємодія контролера з об'єктом мережі
Джерело: розроблено авторами

Через трансивери управління (Wi-Fi, BLE і GSM) здійснюється зв'язок керуючого контролера вузла мережі з оператором і хмарним MQTT сервером з метою отримання команд та відправки інформації телеметрії і поточного стану об'єктів мережі.

Через трансивер UART 2.4 GHz здійснюється обмін даними між контролерами вузлів мережі і моніторинг вузлів мережі з метою підтримки в актуальному стані інформації про топології мережі, таблиць маршрутизації і ієрархії кластерів.

Інтерфейси з трансиверами (Transceivers Interfaces) забезпечують взаємодію трансиверів з блоком доступу до середовища передачі (Media Access Control), які реалізують стек мережевих протоколів (Network Protocol Stack).

Стек мережевих протоколів містить один універсальний протокол, за допомогою якого виконуються функції управління, конфігурації і обміну даними в мережі.

Основним блоком, що визначає інтелект контролера вузла мережі є блок правил і стратегії поведінки мережі (Network Rules and Strategy). У блок входять програмні модулі управління маршрутизацією, перемиканням каналів трансиверів, адаптивної зміни конфігурації мережі при зміні її топології.

Інтерфейс з об'єктом мережі (Network Object Interface) забезпечує взаємодію між контролером вузла мережі і об'єктом мережі.

Оскільки контролер вузла мобільної мережі є незалежним пристроєм, функцією якого є підтримка працездатності мережі, він може бути використаний з будь-яким пристроєм, що має послідовний комунікаційний інтерфейс SPI або UART і відповідну програму управління.

Тому об'єктом мобільної мережі може бути будь-який пристрій, такий, як реле, робототехнічний об'єкт або пристрій управління будь-яким технологічним процесом.

Контролер локальної мережі може мати спрощену структуру за рахунок фізичного об'єднання функцій контролера і об'єкта мережі (виконавчим пристроєм і датчиками), як представлено на рис. 5.

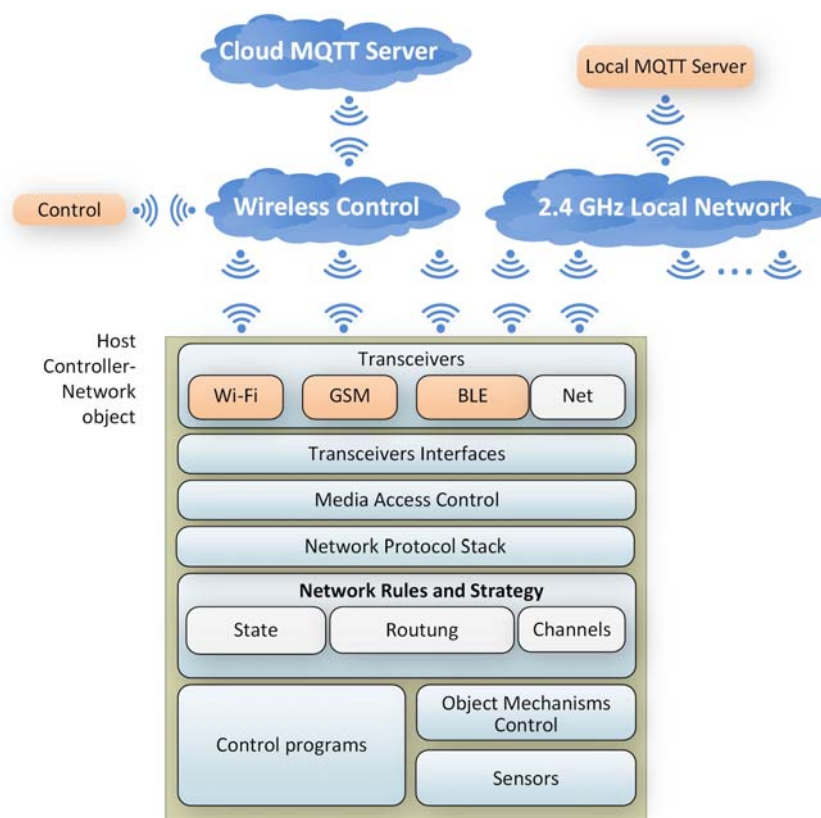


Рисунок 5 – Архітектура контролера вузла мережі і об'єкта мережі

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до розробленої архітектури бездротової локальної мережі були створені алгоритми функціонування, апаратне і програмне забезпечення контролера вузла мережі, а також протокол обміну між вузлами мережі. Протокол обміну для даної мережі є модифікованим варіантом протоколів, використовуваних в мобільній мережі для управління роєм об'єктів [11]. Структура протоколу управління та обміну даними в мережі представлена на рис.6.

За допомогою розробленого протоколу реалізуються функції управління, інформаційного обміну та конфігурації мережі. Режим конфігурації використовується об'єктами мережі для визначення поточної топології мережі, формування кластерів об'єктів, формування таблиць маршрутизації пакетів та інших службових функцій.

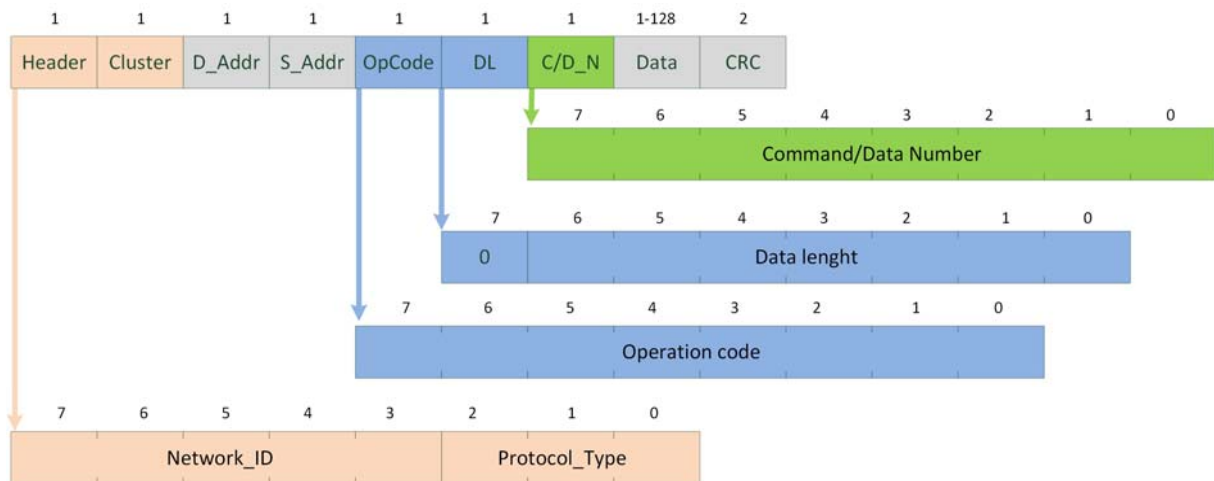


Рисунок 6 – Структура протоколу управління та обміну даними в мережі

Джерело: розроблено авторами

Приймачем і ретранслятором пакетів стає найближчий до оператора контролер вузла мережі. Вибір об'єкта-ретранслятора здійснюється на підставі даних таблиць маршрутизації, які має кожен контролер вузла мережі.

Призначення полів протоколу. Поле «Header» - заголовок протоколу. Поле ідентифікує мережу (32 мережі) і тип протоколу. Ідентифікація мережі необхідна, оскільки кілька мереж можуть перетинатися і знаходитися в загальній зоні покриття.

Поле «Cluster» містить ідентифікатор кластера, до якого належить об'єкт мережі.

Поле «D_Addr» містить адресу об'єкта - одержувача пакета або значення «0xFF» в режимі широкомовної передачі. Поле «Op_ID» містить ідентифікатор оператора мережі. Поле «Op_Code» містить код операції для контролера вузла мережі. Поле «DL» визначає довжину поля даних в байтах.

Поле «C/D_N» містить номер даного пакета в загальній послідовності переданих пакетів. На кожен посланий відправником пакет від одержувача надходить квитанція про його одержання. В процесі ретрансляції пакетів виникає затримка, а в разі ретрансляції пакету по декількох каналах (при збою в системі маршрутизації) – одержувач може прийняти кілька копій пакета.

Якщо пакет прийнятий одержувачем і на нього надіслано квитанцію, то всі інші копії пакета одержувачем відкидаються. Якщо у відповідь на відправлений пакет квитанція не надійшла протягом певного часового інтервалу, вважається, що вузол-ретранслятор вибув з мережі. У цьому випадку програма оператора запускає процедуру виявлення нового вузла-ретранслятора шляхом передачі широкомовного пакета з командою реконфігурації мережі. Після надходження квитанції значення поля «C/D_N» інкрементується по кільцю.

Поле «Data» – поле даних 1-96 байт. Містить параметри команд і дані. Поле «CRC» - контрольна сума.

Безперебійна робота мережі забезпечується програмним забезпеченням контролера вузла мережі. Всі контролери вузлів мережі за замовчуванням рівнозначні, проте їх функції можуть змінюватися в результаті адаптації до фізичної і логічної топології мережі, яка може динамічно змінюватися.

Висновки. Представлена архітектура адаптивної бездротової локальної мережі покладена в основу розробленої системи управління технологічними процесами,

робототехнічними пристроями та іншими об'єктами, а також систем «Розумний будинок» і подібних малих систем без використання MQTT серверів.

Трафік управління відділений від трафіку даних і трафіку конфігурації, що дало можливість здійснювати інформаційний обмін одночасно з командами управління. Мінімізований стек протоколів. Розділена функціональність вузла мережі і об'єкта мережі. Топологія бездротової мережі не детермінована і змінюється при переміщенні об'єктів мережі в просторі. При цьому втрачаються одні зв'язки і виникають інші. Таблиці маршрутизації постійно оновлюються.

Мережа по команді або відповідно до закладеного алгоритму здатна адаптивно вибудовувати потрібну топологію і організовувати необхідні зв'язки з метою виконання об'єктами мережі своїх функцій, а також для побудови ланцюжка ретрансляції пакетів для віддалених об'єктів мережі.

Таким чином, реалізація бездротової мережі при її невисокій вартості і невеликій складності в реалізації дозволяє вирішити універсальне коло завдань. Виконавцем може бути як окремий об'єкт, пов'язаний з іншими об'єктами послідовністю ретрансляторів, так і кілька об'єктів.

З метою підвищення ефективності формування таблиць маршрутизації та мінімізації структур кластерів у бездротовій мережі за доцільне застосування алгоритмів оптимізації на основі теорії множин.

Список літератури

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (дата обращения: 30.09.2020).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (дата обращения: 30.09.2020).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 30.09.2020).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (дата обращения: 30.09.2020).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 30.09.2020).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (дата обращения: 30.09.2020).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (дата обращения: 30.09.2020).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (дата обращения: 30.09.2020).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (дата обращения: 30.09.2020).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (дата обращения: 30.09.2020).
11. Смірнов В.В., Смірнова Н.В. Архітектура контролера вузла адаптивної мобільної мережі з аморфною топологією. Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки». Кропивницький: ЦНТУ, 2020. Вип. 3(34). С. 12-21.
12. MQTT: The Standard for IoT Messaging. URL: <https://mqtt.org/> (дата звернення: 11.12.2020).
13. Richard Coppen OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) TC. URL: https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=mqtt (дата звернення: 11.12.2020).

14. HiveMQ GmbH The Messaging and Data Exchange Protocol of the IoT. URL: <https://www.hivemq.com/mqtt-protocol/> (дата звернення: 12.12.2020).
15. Eclipse Mosquitto™ An open source MQTT broker. URL: <https://mosquitto.org/> (дата звернення: 12.12.2020).

Referencis

1. Brian Verenkov Understanding and Optimizing 802.11n. (July 2011) *Buffalo Technology* : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. *libris.kb.se*. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> [in English].
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. *vesternet.com*. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. *itu.int*. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. *wimaxforum.org*. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems (29 May 2009) : website. *legal.vvv.enseirb-matmeca.fr*. Retrieved from <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> [in English].
11. Smirnov V.V., Smirnova N.V. (2020). Arkhitektura kontrolera vuzla adaptivnoyi mobil'noyi merezhi z amorfnoyu topolohiyeyu [Adaptive mobile network with amorphous topology node controller architecture]. *Zbirnyk naukovykh prats' «Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky» - Collected Works "Central ukrainian scientific bulletin. Technical sciences"*. 3(34). 12-21 [in Ukrainian].
12. MQTT: The Standard for IoT Messaging (n.d.) : website. *mqtt.org* Retrieved from <https://mqtt.org/> [in English].
13. Richard Coppen (n.d.). OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) TC : website. *oasis-open.org*. Retrieved from https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=mqtt [in English].
14. HiveMQ GmbH (n.d.). The Messaging and Data Exchange Protocol of the IoT : website. *hivemq.com* Retrieved from <https://www.hivemq.com/mqtt-protocol/> [in English].
15. Eclipse Mosquitto™ (n.d.) An open source MQTT broker : website. *mosquitto.org*. Retrieved from <https://mosquitto.org/> [in English].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Adaptive Mobile Network with Amorphous Topology Node Controller Architecture

The purpose of the article is to develop an adaptive wireless LAN architecture for the technological processes, robotic devices and other objects control. The article describes the wireless LAN architecture. The concept of a wireless LAN is described. The wireless network is adaptive, self-organizing, and able to operate autonomously. The presented wireless network node controller architecture is the basis for many objects and Smart home control system small systems without using MQTT servers. The nodes of the network nodes interaction is carried out using several transceivers.

The use of multiple transceivers made it possible to distribute data traffic, configuration traffic, and control traffic over different channels, which made it possible to carry out information exchange at the same time. The protocol stack is minimized. The functionality of the host and the network object is completely separated. The topology of the mobile network is not deterministic, amorphous and changes when the network objects move in space. In this case, some connections are lost and others arise. The routing tables are constantly updated.

The network in accordance with the laid down algorithm, is able to build the necessary topology and organize the necessary connections in order to complete the task with a many objects. The network is capable of building packet retransmission chains for remote network objects. Thus, the wireless network implementation at its low cost allows solving a certain range of tasks. The performer can be either a separate object associated with the operator through a many repeaters.

In order to increase the efficiency of the formation of routing tables and minimize the cluster structures in a wireless network, it is advisable to use optimization algorithms based on set theory. The local wireless network is designed to control an Internet of Things objects, robotic objects and control systems for various technological processes.

wireless network, architecture, protocol, controller, object, network node, cluster

Одержано (Received) 02.12.2020

Прорецензовано (Reviewed) 15.12.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

УДК 004.8/681.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.229-235>

Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

e-mail: aron70@ukr.net

Аналіз алгоритмів планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі

В статті проведено аналіз алгоритмів планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі. Головним завданням, яке вирішують технології розподілених обчислень є забезпечення доступу до глобально розподілених ресурсів з допомогою спеціальних інструментів. Складність керування глобальними ресурсами обумовлена тим, що доступ до необхідних даних може відбуватись на різних комп'ютерах. Крім того, глобальні розподілені обчислювальні мережі, які формуються із автономних ресурсів, можуть змінювати свою конфігурацію динамічно. Керування ресурсами в неоднорідних розподілених обчислювальних системах потребує пошуку нових моделей обчислення і керування ресурсами.

обчислювальні ресурси, комп'ютер, алгоритми планування, розподілені обчислення

Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Анализ алгоритмов планирования ресурсами в распределенной вычислительной среде

В статье проведен анализ алгоритмов планирования ресурсами в распределенной вычислительной среде. Главной задачей, которую решают технологии распределенных вычислений, есть обеспечение доступа к глобально распределенным ресурсам с помощью специальных инструментов. Сложность управления глобальными ресурсами связана с тем, что доступ к необходимым данным может происходить на разных компьютерах. Кроме того, глобальные распределенные вычислительные сети, формирующиеся из автономных ресурсов, могут изменять свою конфигурацию динамически. Управление ресурсами в неоднородных распределенных вычислительных системах требует поиска новых моделей вычислений и управления ресурсами.

вычислительные ресурсы, компьютер, алгоритмы планирования, распределенные вычисления

Постановка проблеми. З розвитком технологій розподілених обчислень з'явилися технічні можливості для вирішення масштабних задач в різних областях науки і техніки на територіально-розподілених ресурсах, які належать різним власникам.

Головним завданням, яке вирішують технології розподілених обчислень є забезпечення доступу до глобально розподілених ресурсів з допомогою спеціальних інструментів. Складність керування глобальними ресурсами обумовлена тим, що доступ до необхідних даних може відбуватись на різних комп'ютерах. Крім того, глобальні розподілені обчислювальні мережі, які формуються із автономних ресурсів, можуть змінювати свою конфігурацію динамічно. На теперішній час існує велика кількість стандартних протоколів керування ресурсами і механізмів вимог завдань до ресурсів. Але на практиці виявилось, що ефективні методи і алгоритми планування для однорідних ізольованих мікропроцесорних систем погано адаптуються для розподілених неоднорідних систем. Керування ресурсами в неоднорідних розподілених обчислювальних системах потребує пошуку нових моделей обчислення і керування ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі алгоритми планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі можна класифікувати за різними ознаками: з огляду на будову алгоритму складових, які приймають участь у плануванні; моделей додатків; обмежень якості обслуговування та інших. Схематично ієрархію класифікації алгоритмів планування загального призначення можна представити у такому вигляді (рис. 1):

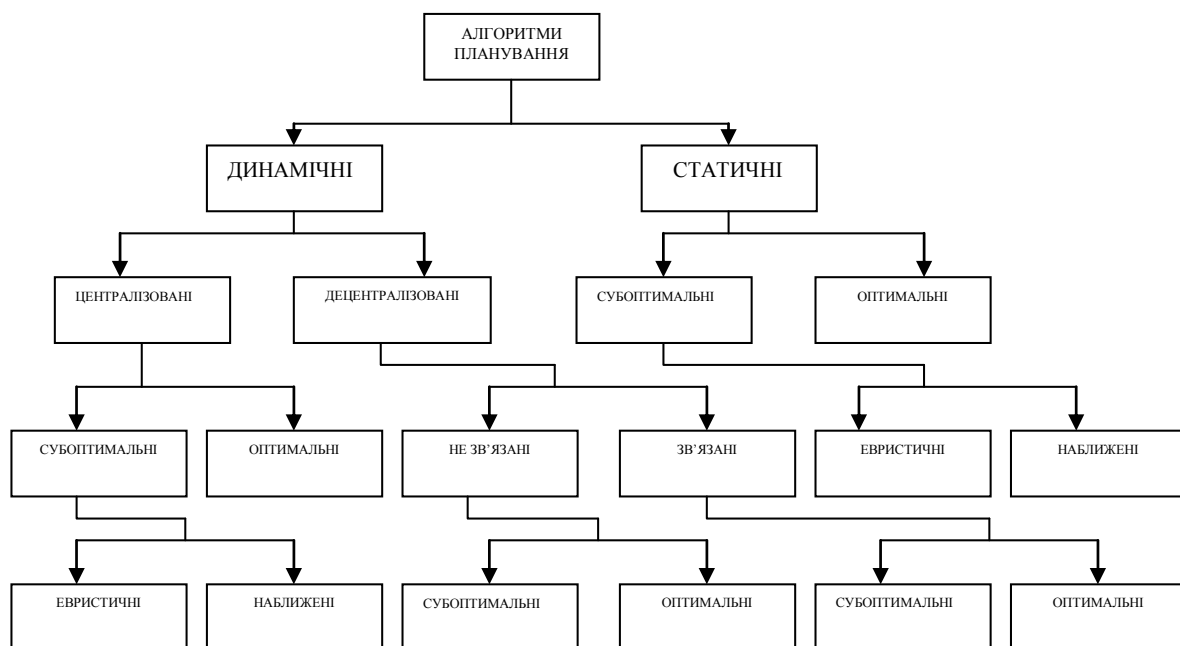


Рисунок 1 – Класифікація алгоритмів планування загального призначення

На верхньому рівні ієрархії класифікація алгоритмів планування загального призначення – статичні та динамічні алгоритми планування ресурсів. Статичне планування та розрахунок вартісного оцінювання обчислень відбувається до виконання завдання, коли інформація відносно всіх ресурсів в розподіленому обчислювальному середовищі є відомою [1–3]. Головною перевагою статичної моделі є відносно не

складна реалізація планувальника. Але вартісна оцінка, яка базується на статичній інформації, погано адаптується до ситуацій, пов'язаних з виходом із ладу одного з обчислювальних вузлів. Тому для вирішення проблеми використовуються механізми перепланування [4].

Динамічне планування частіше всього застосовується тоді, коли потрібно зробити оцінку обчислювальної вартості додатка, що надходить на виконання динамічно в режимі реального часу. Динамічне планування містить в собі два важливих компонента – оцінка стану системи та прийняття рішення про взаємодію завдання із черги з потрібним вибраним ресурсом [5–7].

Алгоритми динамічного планування представлені в роботі [8] присвячені випадку резервування ресурсів, що часто використовується в розподілених обчисленнях, для отримання деякої гарантії стабільності виробничих ресурсів. При використанні динамічних сценаріїв планування відповідальним за прийняття глобальних рішень може бути один централізований планувальник або декілька розподілених. Використання централізованого планувальника має перевагу за рахунок простоти реалізації, але є і недоліки: недостатнє масштабування та невисока відмовостійкість.

Субоптимальні алгоритми планування можна розділити на наближені, які використовують формальні обчислювальні моделі та евристичні алгоритми, які дають більш реальні дані про навантаження системи та виконання завдання.

Розподілені алгоритми планування, в залежності від того як працюють вузли, що використовуються в процесі планування незалежно чи сумісно, розділяють на зв'язні і незв'язні. У випадку незалежного планування локальний планувальник працює автономно і приймає рішення з урахуванням особливостей своїх функцій. У випадку сумісного планування кожен планувальник відповідає за виконання власної частини завдання, але всі планувальники працюють над виконанням спільного завдання[9].

Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на теперішній час реалізація планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі потребує пошуку нових підходів і нових алгоритмів. Більшість робіт присвячених методам планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі використовуються для вирішення певних завдань, пов'язаних з конкретними галузями використання і тому не можуть бути універсальними.

Метою роботи є проведення аналізу алгоритмів планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі з метою пошуку методів і алгоритмів керування ресурсами в проблемно-орієнтованому розподіленому середовищі з урахуванням специфіки окремих завдань та використання можливості паралельного виконання різних завдань.

Виклад основного матеріалу. Під час розробки алгоритмів планування вирішальне значення має визначення чи є залежність між задачами, чи задачі є незалежними[10]. Класифікація алгоритмів планування, яка базується на наявності чи відсутності зв'язку між задачами представлена на рис.2:

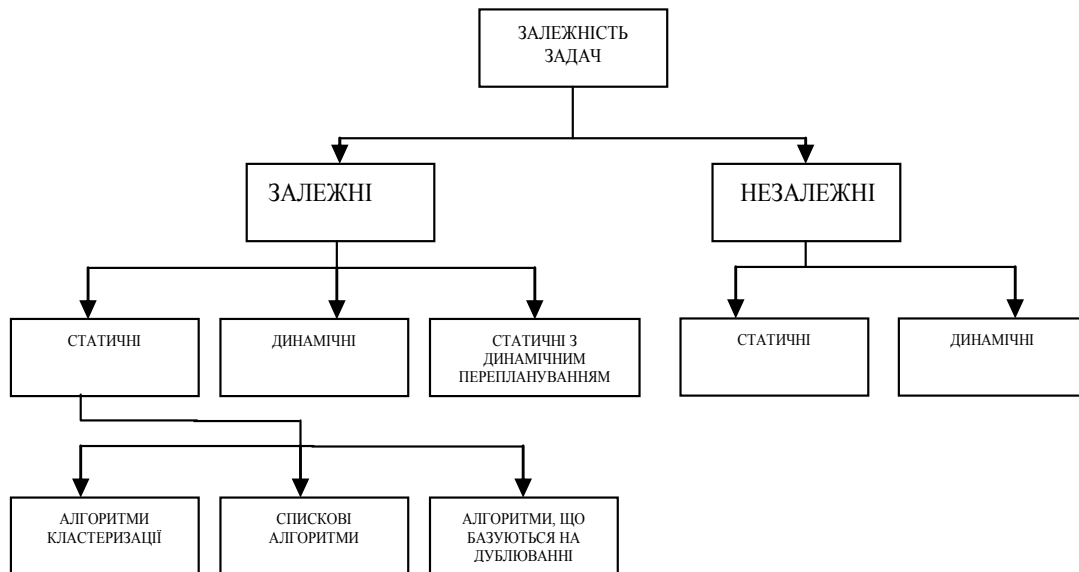


Рисунок 2 – Класифікація алгоритмів планування з залежними і незалежними задачами
Джерело: розроблено автором

Представлені вище алгоритми прогнозують продуктивність для відображення задачі на ресурс. В [11,12] запропоновано алгоритми які не використовують оцінку продуктивності але основані на ідеї дублювання, яку можна реалізувати в розподіленому обчислювальному середовищі де обчислювальні ресурси присутні, але не постійні.

У випадку планування задач, що мають залежності завдання представляються у вигляді орієнтованого ациклічного графа в якому кожна вершина є задачею, а орієнтоване ребро позначає порядок пріоритету між двома вершинами.

Важливою проблемою при плануванні завдань з потоковою структурою є компроміс між використанням максимального паралелізму завдань в задаванні і мінімізації комунікаційних затримок [13]. Для вирішення даної проблеми в обчислювальних системах запропоновано три види алгоритмів: алгоритм списку, алгоритми дублювання та алгоритми кластеризації [14,15].

Планування списком – це клас алгоритмів планування в якому задачам присвоюють пріоритети, задачі вкладають у список, впорядкований по мірі зменшення величини пріоритету. Рішення про вибір задачі для виконання із списку відбувається на основі пріоритету. Класичними прикладами алгоритму списку є HEFT та FCP [14,15].

Алгоритми, що базуються на дублюванні відрізняються стратегіями вибору задач для дублювання. Спочатку алгоритми цієї групи застосовувались для необмеженого числа однакових процесорів, таких як багатопроцесорні системи з розподіленою пам'яттю. Також відрізняються біль складною структурою в порівнянні з попередніми. Наприклад Darbha, TDS та інші [16].

Для застосування в розподіленому середовищі пізніше був запропонований був запропонований алгоритм з назвою “алгоритм планування основою якого є дублювання задач для гетерогенний систем” або TANH [17,18]. На теперішній час алгоритми засновані на дублюванні, в розподіленому обчислювальному середовищі, використовуються виключно для незалежних завдань.

Застосування алгоритмів кластеризації в паралельних і розподілених системах дозволяє зменшити комунікаційну затримку; ідея таких алгоритмів в кластеризації взаємозв'язаних задач в групи для подальшого їх присвоєння певній визначеній групі

ресурсів. Прикладами таких алгоритмів є DSC, CASS-II [19]. Експериментальні дослідження таких алгоритмів приводяться в роботі [20].

Висновки. Проведений аналіз алгоритмів планування ресурсів в розподіленому обчислювальному середовищі показує, що на сьогоднішній день створено велику кількість алгоритмів планування, орієнтованих на використання в розподіленому обчислювальному середовищі. Але часто такі алгоритми не враховують проблемно-орієнтовану специфіку середовища, а це впливає на ефективність планування. В зв'язку з цим перспективним є напрям, пов'язаний з розробкою алгоритмів планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі, які б дозволили створити ефективну і дієву систему планування ресурсів.

Список літератури

1. Braun, R. A Comparison of Eleven Static Heuristics for Mapping a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Distributed Computing Systems / R. Braun, H. Siegel et al. // *Parallel and Distributed Computing*. 2001. Vol. 61, No. 6, P. 810–837.
2. Casanova, H. Heuristics for Scheduling Parameter Sweep Applications in Grid Environments / H. Casanova, A. Legrand et al. // *Heterogeneous Computing Workshop (HCW'00): Proceedings of the 9th Workshop (Cancun, Mexico, May 1, 2000)*. IEEE Computer Society, 2000. P. 349–363.
3. You, S.Y. Task Scheduling Algorithm in GRID Considering Heterogeneous Environment / S.Y. You, H.Y. Kim et al. // *Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA '04): Proceedings of the International Conference (Nevada, USA, June 21–24, 2004)*. CSREA Press, 2004. Vol. 1. P. 240–245.
4. Cooper, K. New Grid Scheduling and Rescheduling Methods in the GrADS Project / Cooper, A. Dasgupta et al. // *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04): Proceedings of the 18th International Symposium (Santa Fe, New Mexico USA, April 26–30, 2004)*. IEEE Computer Society, 2004. P. 199–206.
5. Kurowski, K. Improving Grid Level Throughput Using Job Migration And Rescheduling / K. Kurowski, B. Ludwiczak et al. // *Scientific Programming*. 2004. Vol. 12, No. 4. P. 263–273.
6. Takefusa, A. A Study of Deadline Scheduling for Client-Server Systems on the Computational Grid / A. Takefusa, S. Matsuoka et al. // *High Performance Distributed Computing (HPDC-10): Proceedings of the 10th IEEE International Symposium (San Francisco, California, USA, August 7–9, 2001)*. IEEE Computer Society, 2001. P. 406–415.
7. Chen, H. Distributed Dynamic Scheduling of Composite Tasks on Grid Computing Systems / H. Chen, M. Maheswaran // *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2002): Proceedings of the 16th International Symposium (Fort Lauderdale, FL, USA, April 15–19, 2002)*. IEEE Computer Society, 2002. P. 88–97.
8. Muthuvelu, N. A Dynamic Job Grouping-Based Scheduling for Deploying Applications with Fine-Grained Tasks on Global Grids / N. Muthuvelu, J. Liu et al. // *Grid Computing and e-Research (AusGrid 2005): Proceedings of the 3rd Australasian Workshop (Newcastle, NSW, Australia, January 30 – February 4, 2005)*. Australian Computer Society, 2005. P. 41–48.
9. Shan, H. Scheduling in Heterogeneous Grid Environments: The Effects of Data Migration / H. Shan, L. Olikar et al. // *Advanced Computing and Communication (ADCOM 2004): Proceedings of the 12th IEEE International Conference (Ahmedabad Gujarat, India, December 15–18, 2004)*. IEEE Computer Society, 2004. P. 1–8.
10. Dong, F. Scheduling algorithms for grid computing: State of the art and open problems. Technical Report No. 2006-504 / F. Dong, S.G. Akl, — Queen's University, Canada, 2006.—P. 55.
11. Subramani, V. Distributed Job Scheduling on Computational Grids using Multiple Simultaneous Requests / V. Subramani, R. Kettimuthu et al. // *High Performance Distributed Computing (HPDC 2002): Proceedings of 11th IEEE Symposium (Edinburgh, Scotland, July 23–26, 2002)*. IEEE Computer Society, 2002. P. 359–366.
12. El-Rewini, H. Task Scheduling in Parallel and Distributed Systems / H. El-Rewini, T. Lewis, H. Ali — Prentice Hall, 2010. 290 p.
13. Radulescu, A. On the Complexity of List Scheduling Algorithms for Distributed Memory Systems / A. Radulescu, A.J.C. Gemund // *Supercomputing (SC'99): Proceedings of 13th International Conference (Portland, Oregon, USA, November 13–19, 1999)*. IEEE Computer Society, 1999. P. 68–75.

14. Sakellariou, R. A Low-cost Rescheduling Policy for Efficient Mapping of Workflows on Grid Systems / R. Sakellariou, H. Zhao // *Scientific Programming*. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 253–262.
15. Darbha, S. Optimal Scheduling Algorithm for Distributed Memory Machines / S. Darbha, D.P. Agrawal // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 1998. Vol. 9, No. 1. P. 87–95.
16. Ranaweera, S. A Task Duplication Based Scheduling Algorithm for Heterogeneous Systems/ S. Ranaweera, D.P. Agrawal // *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'00): Proceedings of 14th International Symposium (Cancun, Mexico, May 1–5, 2018)*. IEEE Computer Society, 2005. P. 445–450.
17. Bajaj, R. Improving Scheduling of Tasks in A Heterogeneous Environment / R. Bajaj, D.P. Agrawal // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2004. Vol. 15, No. 2. P. 107–118.
18. Yang, T. DSC: Scheduling Parallel Tasks on an Unbounded Number of Processors / Yang, A. Gerasoulis // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 1994. Vol. 5, No. 9. P. 951–967.
19. Liou, J. A Comparison of General Approaches to Multiprocessor Scheduling / J. Liou, M.A. Palis // *International Parallel Processing Symposium (IPPS '97): Proceedings the 11th International Symposium (Geneva, Switzerland, April 1–5, 1997)*. IEEE Computer Society, 1996. P. 152–156.

References

1. Braun, R. A Comparison of Eleven Static Heuristics for Mapping a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Distributed Computing Systems / R. Braun, H. Siegel et al. // *Parallel and Distributed Computing*. 2001. Vol. 61, No. 6, P. 810–837. [in English].
2. Casanova, H. Heuristics for Scheduling Parameter Sweep Applications in Grid Environments / H. Casanova, A. Legrand et al. // *Heterogeneous Computing Workshop (HCW'00): Proceedings of the 9th Workshop (Cancun, Mexico, May 1, 2000)*. IEEE Computer Society, 2000. P. 349–363. [in English].
3. You, S.Y. Task Scheduling Algorithm in GRID Considering Heterogeneous Environment / S.Y. You, H.Y. Kim et al. // *Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA '04): Proceedings of the International Conference (Nevada, USA, June 21–24, 2004)*. CSREA Press, 2004. Vol. 1. P. 240–245. [in English].
4. Cooper, K. New Grid Scheduling and Rescheduling Methods in the GrADS Project / Cooper, A. Dasgupta et al. // *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04): Proceedings of the 18th International Symposium (Santa Fe, New Mexico USA, April 26–30, 2004)*. IEEE Computer Society, 2004. P. 199–206. [in English].
5. Kurowski, K. Improving Grid Level Throughput Using Job Migration And Rescheduling / K. Kurowski, B. Ludwiczak et al. // *Scientific Programming*. 2004. Vol. 12, No. 4. P. 263–273. [in English].
6. Takefusa, A. A Study of Deadline Scheduling for Client-Server Systems on the Computational Grid / A. Takefusa, S. Matsuoka et al. // *High Performance Distributed Computing (HPDC-10): Proceedings of the 10th IEEE International Symposium (San Francisco, California, USA, August 7–9, 2001)*. IEEE Computer Society, 2001. P. 406–415. [in English].
7. Chen, H. Distributed Dynamic Scheduling of Composite Tasks on Grid Computing Systems / H. Chen, M. Maheswaran // *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2002): Proceedings of the 16th International Symposium (Fort Lauderdale, FL, USA, April 15-19, 2002)*. IEEE Computer Society, 2002. P. 88–97. [in English].
8. Muthuvelu, N. A Dynamic Job Grouping-Based Scheduling for Deploying Applications with Fine-Grained Tasks on Global Grids / N. Muthuvelu, J. Liu et al. // *Grid Computing and e-Research (AusGrid 2005): Proceedings of the 3rd Australasian Workshop (Newcastle, NSW, Australia, January 30 – February 4, 2005)*. Australian Computer Society, 2005. P. 41–48. [in English].
9. Shan, H. Scheduling in Heterogeneous Grid Environments: The Effects of Data Migration / H. Shan, L. Olikar et al. // *Advanced Computing and Communication (ADCOM 2004): Proceedings of the 12th IEEE International Conference (Ahmedabad Gujarat, India, December 15–18, 2004)*. IEEE Computer Society, 2004. P. 1–8. [in English].
10. Dong, F. Scheduling algorithms for grid computing: State of the art and open problems. Technical Report No. 2006-504 / F. Dong, S.G. Akl, Queen's University, Canada, 2006. P. 55. [in English].
11. Subramani, V. Distributed Job Scheduling on Computational Grids using Multiple Simultaneous Requests / V. Subramani, R. Kettimuthu et al. // *High Performance Distributed Computing (HPDC 2002):*

- Proceedings of 11th IEEE Symposium (Edinburgh, Scotland, July 23–26, 2002). IEEE Computer Society, 2002. P. 359–366. [in English].
12. El-Rewini, H. Task Scheduling in Parallel and Distributed Systems / H. El-Rewini, T. Lewis, H. Ali — Prentice Hall, 2010. 290 p. [in English].
 13. Radulescu, A. On the Complexity of List Scheduling Algorithms for Distributed Memory Systems / A. Radulescu, A.J.C. Gemund // Supercomputing (SC'99): Proceedings of 13th International Conference (Portland, Oregon, USA, November 13–19, 1999). IEEE Computer Society, 1999. P. 68–75. [in English].
 14. Sakellariou, R. A Low-cost Rescheduling Policy for Efficient Mapping of Workflows on Grid Systems / R. Sakellariou, H. Zhao // Scientific Programming. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 253–262. [in English].
 15. Darbha, S. Optimal Scheduling Algorithm for Distributed Memory Machines / S. Darbha, D.P. Agrawal // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 1998. Vol. 9, No. 1. P. 87–95. [in English].
 16. Ranaweera, S. A Task Duplication Based Scheduling Algorithm for Heterogeneous Systems/ S. Ranaweera, D.P. Agrawal // International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'00): Proceedings of 14th International Symposium (Cancun, Mexico, May 1–5, 2000). IEEE Computer Society, 2000. P. 445–450. [in English].
 17. Bajaj, R. Improving Scheduling of Tasks in A Heterogeneous Environment / R. Bajaj, D.P. Agrawal // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2004. Vol. 15, No. 2. P. 107–118. [in English].
 18. Yang, T. DSC: Scheduling Parallel Tasks on an Unbounded Number of Processors / Yang, A. Gerasoulis // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 1994. Vol. 5, No. 9. P. 951–967. [in English].
 19. Liou, J. A Comparison of General Approaches to Multiprocessor Scheduling / J. Liou, M.A. Palis // International Parallel Processing Symposium (IPPS '97): Proceedings the 11th International Symposium (Geneva, Switzerland, April 1–5, 1997). IEEE Computer Society, 1996. P. 152–156. [in English].

Roman Minailenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Resource Planning Algorithms in a Distributed Computing Environment

The article analyzes resource scheduling algorithms in a distributed computing environment. The main task that distributed computing technologies solve is providing access to globally distributed resources using special tools. The complexity of managing global resources is due to the fact that access to the necessary data can occur on different computers. In addition, global distributed computing networks formed from autonomous resources can change their configuration dynamically. Resource management in heterogeneous distributed computing systems requires the search for new models of computation and resource management.

Analysis of recent research and publications has shown that currently the implementation of resource planning in a distributed computing environment requires the search for new approaches and new algorithms. Most of the work on resource planning methods in a distributed computing environment is used to solve specific tasks related to specific applications and therefore cannot be universal. The aim of the work is to analyze resource planning algorithms in a distributed computing environment in order to find methods and algorithms for resource management in a problem-oriented distributed environment, taking into account the specifics of individual tasks and use the possibility of parallel execution of different tasks.

The analysis of resource planning algorithms in a distributed computing environment shows that to date, a large number of planning algorithms focused on use in a distributed computing environment. But often such algorithms do not take into account the problem-oriented specifics of the environment, and this affects the efficiency of planning. In this regard, a promising area is related to the development of resource planning algorithms in a distributed computing environment, which would create an efficient and effective resource planning system.

computing resources, computer, scheduling algorithms, distributed computing

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020

ЗМІСТ

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

<i>С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко</i> Оцінка ефективності глибокого безполицевого обробітку ґрунту	3
<i>В.А. Дейкун, Д.Ю. Артеменко, С.І. Дейкун</i> Вплив параметрів розподільника на якість розсіювання добрив у підлаповому просторі	12
<i>О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, Д.І. Петренко, Д.Ю. Артеменко</i> Дослідження режимних характеристик гравітаційної прямої кривої живильного пристрою	20
<i>Е. Б. Алієв, К. О. Лупко</i> Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур.....	27
<i>К.В. Васильковська, М.М. Ковальов, Л.А. Молокост</i> Технічне та технологічне забезпечення краплинного зрошення овочевих культур.....	35
<i>А.С. Лімонт, З.А. Лімонт</i> Вантажопідйомність і споживана потужність кузовних машин для внесення твердих органічних добрив.....	41
<i>О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, С.М. Мороз, О.В. Нестеренко, Л.А. Молокост</i> До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора.....	52
<i>І.М. Дударєв, В.О. Ольховський</i> Моделювання подачі сипкого матеріалу на решето сепаратора ножичного типу.....	59
<i>А.Я. Кузьмич, М.М. Анеляк, О.М. Грицака</i> Збирання незернової частини урожаю соняшнику на енергетичні цілі	69
<i>М.В. Півень</i> Експериментальні дослідження розподілу питомого завантаження суміші по площі нахилоного лотка.....	78
<i>Р.А. Калініченко, С.П. Степаненко, Б.І. Котов</i> Формування швидкісного режиму вібропереміщення зерна в процесах термообробки.....	88
<i>І.М. Осипов</i> Обґрунтування типу повітророзподільного пристрою пневмомеханічних просапних сівалок	97

<i>Р.В. Кісільов, В.С. Хмельовський, П.Г. Лузан, І.П. Сисоліна</i> Дослідження двосекційного змішувача для приготування збалансованих сумішей на фермах ВРХ.....	107
---	-----

<i>В.О. Швидя, С.П. Степаненко</i> Математичне моделювання процесу роботи сушильної камери баштової зерносушарки зі всмоктувальним повітряним потоком.....	114
---	-----

<i>С.П. Степаненко, Б.І. Котов</i> Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку.....	122
---	-----

<i>В.О. Дубовик, Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов, В.М. Чернов</i> Підвищення довговічності роликів-електродів при електроконтактному наплавленні деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки	133
--	-----

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>В.М. Кривітний, М.О. Свірень, О.В. Кузик, В.В. Амосов, М.А. Козловський</i> Технологічні особливості виготовлення дискових робочих органів ґрунтообробних та посівних машин.....	140
--	-----

<i>Ю.А. Невдаха, В.О. Дубовик, Н.А. Невдаха, Ф.Й. Златопольський</i> До розрахунку зубців прямокутних циліндричних передач на згин.....	151
--	-----

<i>Kyryl Shcherbyna, Andrii Hrechka, Vitalii Mazhara, Tetiyna Diachenko</i> Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable geometry of sticks	159
--	-----

<i>А.Ю. Лисих, С.М. Коб'яков</i> Аналіз інноваційних технологій механічної переробки текстильної сировини	164
--	-----

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Ю.В. Кулешков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, Р.А. Осін</i> Дослідження розподілення електричного струму при відновленні автомобільних деталей контактним наварюванням	173
---	-----

<i>В.И. Цану, В.Ф. Горобец</i> Износостойкость сопряжений с зазором, восстановленных полиамидоэпоксидными пористыми покрытиями	182
---	-----

<i>М.М. Студент, М.Я. Головчук, В.М. Гвоздецький, Г.Г. Веселівська, С.І. Маркович, Р.А. Яцюк</i> Вплив складу шихтових матеріалів порошкових дротів на механічні характеристики та корозійну стійкість електродугових покриттів.....	188
---	-----

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

В.И. Ветохин, В.В. Голдыбан, М.И. Курилович

Способ и устройство для автоматического распознавания некондиционных клубней картофеля196

О.І. Субочев, Д.С. Білий, О.Є. Січко

Підвищення ефективності функціонування виробничо-технічної бази сервісних підприємств206

В.В. Смірнов, Н.В. Смірнова

Архітектура адаптивної бездротової локальної мережі для управління об'єктами і пристроями.....219

Р.М. Минайленко

Аналіз алгоритмів планування ресурсами в розподіленому обчислювальному середовищі229

CONTENT

AGROENGINEERING

<i>Serhii Leshchenko, Vasyl Salo, Dmytro Petrenko</i> Evaluation of the Efficiency of Soil with Deep Chiseling.....	3
<i>Viktor Deikun, Dmytro Artemenko, Svitlana Deikun</i> Influence of Distributor Parameters on the Quality of Fertilizer Scattering in the Under-foot Space	12
<i>Olexandr Nesterenko, Olexiy Vasylykovskiy, Dmytro Petrenko, Dmytro Artemenko</i> Study of Performance Characteristics of the Gravitational Guide Curve of Feeder Unit.....	20
<i>Elchyn Aliiev, Christina Lupko</i> Morphological Characteristics and Physical & Mechanical Properties of seeds of small-seeded crops	27
<i>Kateryna Vasylykovska, Mykola Kovalov, Ludmyla Molokost</i> Technical and Technological Support of Drip Irrigation of Vegetable Crops.....	35
<i>Anatoliy Limont, Zlata Limont</i> The Load-carrying Capacity and Power Consumption of Body Machines for Applying Solid Organic Fertilizers	41
<i>Olexiy Vasylykovskiy, Sergiy Leshchenko, Sergiy Moroz, Olexandr Nesterenko, Ludmyla Molokost</i> Before Creating the Concept of the «Ideal» Grain Separator Sieve	52
<i>Igor Dudarev, Vasyl Olkhovskiy</i> Modeling of Bulk Material Loading Into Sieve of the Scissor-type Separator	59
<i>Alvian Kuzmych, Mykhailo Aneliak, Oleksandr Hrytsaka</i> Collection of non-grain part of sunflower harvest for energy purposes	69
<i>Mykhailo Piven</i> Experimental Studies Of The Specific Load Distribution Of The Mixture Over The Area Of The Inclined Tray.....	78
<i>Roman Kalinichenko, Serhii Stepanenko, Boris Kotov</i> Formation of a High-speed Mode of Vibration Displacement of Grain During Heat Treatment.....	88
<i>Ihor Osypov</i> Substantiation of the Type of Air Switchgear of Pneumomechanical Seed Drills	97
<i>Ruslan Kisilyov, Vasil Khmelevsky, ., Petro Luzan, Iryna Sysolina</i> Study of a Two-section Mixer for the Preparation of Balanced Mixtures on Cattle Farms	107

Viktor Shvidia, Serhii Stepanenko

Mathematical Modeling of the Process of Operation of the Drying Chamber
of a Tower Grain Dryer With a Suction Air Flow114

Serhii Stepanenko, Boris Kotov

Main the Oretical Provisions of Grain Material Separation in Air Channels
with Unequal Air Flow Speed.....122

Viktor Dubovyk, Yurii Nevdakha, Viktor Pukalov, Vldyslav Chernov

Increasing the Durability of Roller-electrodes in Electrocontact Surfacing
of Parts of Mobile Agricultural and Transport Equipment133

BRANCH ENGINEERING

*Volodymyr Kropivny, Mykola Sviren, Olexandr Kuzyk, Volodymyr Amosov,
Mykola Kozlovsky*

Technological Features of the Manufacture of Disk Working Bodies of Tillage
and Seeding Machines140

Yurii Nevdakha, Viktor Dubovyk, Nataliia Nevdakha, Fedir Zlatopolskiy

Before Calculating the Teeth of Spur gears on the Bend.....151

Kyryl Shcherbyna, Andrii Hrechka, Vitalii Mazhara, Tetiyana Diachenko

Kinematics of cutting process while honing holes with a hone with variable
geometry of sticks159

Alla Lisikh, Sergey Kobayakov

Analysis of Innovative Technologies for Mechanical Processing of Textile Raw
Materials.....164

MATERIALS SCIENCE

Yuriy Kuleshkov, Timofey Rudenko, Mykhailo Krasota, Ruslan Osin

The Researching of Dynamic Electricity Distribution Along with the Renovation of
Automobile Details by the Contact Covering Welding173

Veaceslav Tapu, Vladimir Gorobet

Wear and Tear Resistance of Coupling Fits with Clearance Restored by
Porous Epoxy Polyamide coatings.....182

*Mykhajlo Student, Myroslav Golovchuk, Volodymyr Hvozdetkii, Halyna Veselivska,
Sergiy Markovych, Rostyslav Yatsyuk*

Influence of Composition of Charge Materials of Flux-cored Wires
on Mechanical Characteristics and Corrosion Resistance of Electric Arc Coatings188

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Volodimir Vetokhin, Viktor Goldyban, M. Kurylovich

Method and Device for Automatic Recognition of Unconditional Potato Tubes196

Olexander Subochev, Denis Biliy, Olexander Sichko

Improving the Efficiency of the Production and Technical Base of Service Enterprises206

Volodymyr Smirnov, Natalia Smirnova

Adaptive Mobile Network with Amorphous Topology Node Controller Architecture219

Roman Minailenko

Analysis of Resource Planning Algorithms in a Distributed Computing Environment229

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело
Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською (російською) мовами – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми. *Statement of the problem***
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Analysis of recent researches and publications***
3. **Постановка завдання (мета статті). *Statement of the objective***
4. **Виклад основного матеріалу. *The main material***
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень. *Conclusions and prospects for further researches***

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
6. Ідентично з 2-5 російською (українською) мовою.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. *
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Сайт збірника: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Адреса для надсилання: stat_kntu@ukr.net, serafsgm@ukr.net

ДОВІДКА ПРО АВТОРА **українською, російською та англійською мовами**

	Українською	Російською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:			
Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:			
Посада (повна назва, без аббревіатур):			
Наукова ступінь:			
Вчене звання:			
Назва статті:			
*Спеціальність:			
Адреса для надсилання збірнику:			
Контактні телефони (бажано мобільний):			
E-mail:			
ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)			

* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

**Конструювання, виробництво та експлуатація
сільськогосподарських машин**

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник

Заснований у 1971 році

Випуск 50

За загальною редакцією М.І. Черновола

Відповідальний за випуск С.М. Лещенко

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво про реєстрацію № 05720-ПП-1 від 10.12.1996.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Здано в набір 17.12.2020. Підписано до друку 21.12. 2020. Формат 60x84 1/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman Умов. друк. арк. 30,5
Обл. вид. арк. 37,7. Наклад 300 прим. Замовлення №_0245