

Видається з 1996 року

Засновник і видавець
Сумський національний аграрний
університет

Реєстраційне свідоцтво
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

Редакційна колегія серії

Тарельник В.Б., доктор технічних наук, професор, головний редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна)
Соларьов О.О., кандидат технічних наук, доцент, заступник головного редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Думанчук М.Ю., Сумський національний аграрний університет, відповідальний секретар (Україна)

Антошевський Б., доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

Кундера Чеслав, доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

Кирик Г.В., доктор технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Лобода В.Б., кандидат фізико-математичних наук, професор, заступник редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Довжик М.Я., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Коноплянченко Є.В., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Хінек Рубік, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

Девід Херак, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

Сабадаш С.М., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»
Випуск 4 (46), 2021

ЗМІСТ

Антипчук Б. О. Сучасні вимірювачі щільності ґрунту: їх огляд та дослідження застосування ультразвуку для оперативного визначення переущільненої ділянки поля, яке обробляється.....	3
Зубко В. М. Дослідження впливу чистоти посівної борозни на врожайність при вирощуванні кукурудзи на зерно.....	11
Павельчук Ю. Ф., Ляшук О. Л., Грушецький С. М., Прокопова О. П. Моделювання технологічного процесу сівби зернових культур сошниками для прямого посіву на схилах.....	18
Петров Л. М., Кішняус І. В., Масліч Н. Я., Скориченко О. І. Елементи теорії гнучкої трансмісії вантажного автомобіля.....	25
Петров Л. М., Петрик Ю. М. Теорія колісного рушія вантажного автомобіля з розширеними енергетичними можливостями.....	35
Пуховський Є. С. Усунення вібрацій у разі багатолезової обробки.....	42
Savchenko-Pererva M. Yu., Radchuk O. V. Improvement of dust collectors for implementation in the food industry.....	50
Самілик М. М. Фізичне обґрунтування параметрів осмотичної дегідратації як способу обробки коренеплідних овочів.....	55
Zhang Zhengchuan The characterization of silver coating on the surface of tin bronze by electro-spark deposition.....	60



Науковий журнал
«Вісник Сумського національного
аграрного університету.
Серія: Механізація та автоматизація
виробничих процесів»
внесений до переліку наукових
фахових видань України
(категорії «Б») у галузі технічних наук
(131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»,
208 «Агроінженерія»)
на підставі Наказу Міністерства
освіти і науки України № 1188
від 24.09.2020 (додаток 5)

Науковий журнал «Вісник
Сумського національного аграрного
університету» індексується в
Міжнародних наукометричних базах
Index Copernicus, РІНЦ

Матеріали журналу знаходяться
у вільному доступі на сайті
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру
таємного рецензування. До
публікації в журналі не допускаються
матеріали, якщо є достатньо підстав
вважати, що вони є плагіатом.
Відповідальність за точність
наведених даних і цитат
покладається на авторів.
Матеріали друкуються українською
та англійською мовами.
У разі цитування посилання на
«Вісник Сумського національного
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням
вченої ради
Сумського національного
аграрного університету
(Протокол № 6 від 20.12.2021 р.)

Видавництво і друкарня –
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса,
вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (048) 709 38 69,
+38 (095) 934-48-28,
+38 (097) 723-06-08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої
справи ДК № 6424 від 04.10.2018 р.

Тираж 300 пр.
Зам. № 0322/105

© Сумський національний
аграрний університет, 2021

СУЧАСНІ ВИМІРЮВАЧІ ЩІЛЬНОСТІ ҐРУНТУ: ЇХ ОГЛЯД ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕУЩІЛНЕНОЇ ДІЛЯНКИ ПОЛЯ, ЯКЕ ОБРОБЛЯЄТЬСЯ

Антипчук Богдан Олександрович

викладач спеціальних дисциплін першої категорії,
здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії
Житомирський агротехнічний фаховий коледж, м. Житомир, Україна
ORCID: 0000-0002-1426-4782
bogdanantypchuk@ukr.net

Зміни, які відбуваються в агропромисловому комплексі потребують розробки та створення нових знарядь і машин, та вдосконалення наявних. Це, в свою чергу, можливо лише при розгляданні обробітку ґрунту як доповнення до природних процесів утворення самого ґрунту із врахуванням біологічних, фізичних та механічних властивостей, а також зменшенням енергетичних затрат на його обробіток, через те, що агротехнічні заходи основного обробітку ґрунту з економічної точки зору є найбільш енергоощадними серед всього комплексу технологічних операцій вирощування та збирання сільськогосподарських культур. Тому проблема створення енергоощадних технологій та технічних засобів обробітку ґрунту, які сприяють цьому збереженню – це ні що інше, як проблема екологічного та енергетичного значення, яка не може бути вирішена простим зменшенням глибини обробітку ґрунту.

Таким чином, для розв'язання цих питань необхідно застосовувати більш прогресивні методи обробітку, зокрема, розущільнення ґрунту. Важливим є технічне забезпечення цієї технологічної операції в сучасній галузі рослинництва, щоб понести найменші енергетичні затрати та підвищити врожайність сільськогосподарських культур.

У статті наведено аналіз наявних сучасних приладів для вимірювання щільності ґрунту в режимі безперервної реєстрації: пенетраторів, пенетрометрів, цифрових твердомірів, GPS-пенетрометрів, а також розглядається питання застосування ультразвуку для виявлення ущільнених ділянок поля, яке обробляється. Розглядається акустична поведінка плужної підшви, її основні акустичні константи.

Описано основні результати проведеного дослідження на базі розробленої моделі оперативної системи визначення глибини залягання ущільненого шару ґрунту із застосування радіофізичного методу дослідження механічних і фізичних властивостей ґрунту, які базуються на ультразвуковому випромінюванні, методу безперервного радіохвильового профілювання в русі, тобто сканування ґрунту відбувається під час руху машинно-тракторного агрегату в момент обробітку поля, методу синтезу технічних засобів, теорії автоматичного управління із застосуванням ультразвукового пристрою визначення глибини залягання плужної підшви (ПВГП).

Проведено аналіз одержаних результатів із застосуванням датчика з одним та двома каналами приймально-передавального тракту. Досліджується оптимальна висота встановлення датчика над поверхнею ґрунту.

Ключові слова: пенетратор, пенетрометр, ґрунторозпушувач, твердомір, ультразвук, радіофізичний пристрій, датчик, плужна підшва, приймально-передавальний пристрій випромінювання, акустична провідність.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.1>

Вступ. Більшість сучасних приладів дають змогу вести вимірювання в режимі безперервної реєстрації одночасно з обробленням ґрунту: вимірювати вологість, твердість та інші показники, акумулювати результати, статистично і графічно їх обробляти. Такі твердоміри (Gogolinskiy et al., 2019; Vashko et al., 2019) є американського, голландського та словацького виробництва. Розробки таких твердомірів проводяться і в Україні. Наприклад, твердомір М. М. Сурду (Surdu et al., 2002): шуканий результат отримують зі співвідношення тиску пуансона при його зануренні в ґрунт й величини залишкової деформації. Тензометричний датчик кріпиться до лапи культиватора і вимірювання твердості здійснюються під час виконання обробки ґрунту. Змінюючи форму пуансона, можна оцінити опір ґрунту різним видам деформації і використовувати отримані дані не тільки при виборі інтенсивності й глибини обробки, а й в конструюванні ґрунтообробних робочих органів.

Подібний твердомір був розроблений і випробуваний у Швеції. Конусоподібні пенетратори (Ahrens et al., 2021; Ebato, 2020; Saye et al., 2020; Vakili et al., 2021) з кутом атаки в 30 ° і діаметром 6,3 см були укріплені на лапах глибокорозпушувача і давали змогу проводити вимірювання твердості на глибинах 10, 30 і 50 см. Пенетратор був з'єднаний з сенсором фірми Bosch, здатним вимірювати зусилля в широкому інтервалі значень. При швидкості обробки ґрунту 1,5 м / с твердомір фіксував вимірювання кожної секунди з одночасним позиціонуванням (за допомогою Trimble SweeEight).

Мобільні пенетрометри (Ahmed, 2020) – пристрої, що укріплюються на колесах мобільного засобу, на трейлерах або вантажівках. Їх доставляють на досліджувану ділянку разом з моторами, електробатареями або іншими джерелами енергії. Додавання лишньої ваги для мобільного пристрою вантажівки збільшує потенційний максимум сили занурення, а довжина проникаючого

удару може бути збільшена без обмеження потрібної ваги в порівнянні з іншими типами пенетрометрів. Ці пристрої оснащені мультипенетрометрами (Hashem & Nikudel, 2016; Herric & Jones, 2002; Latvala et al., 2020; Thiel et al., 2020) для одночасного дослідження декількох ділянок, щоб отримати дані про тривимірну просторову характеристику твердості ґрунту для побудови відповідної карти. З огляду та аналізу літератури відомо, що такі основні фізико – механічні властивості ґрунту як твердість, щільність, вологість і інші змінюються через кожні 5-10 м по ходу руху сільськогосподарських агрегатів. Визначення показників традиційними твердомірами, що характеризують стан ґрунту, проводиться лише в певних точках поля, попередньо розбитого на сектори, ділянки тощо, при цьому, кількість точок, в яких проводяться вимірювання, обмежується складністю, трудомісткістю і тривалістю проведення цих вимірювань. Тобто, стає зрозуміло, що картина, яка показує розподіл даних властивостей ґрунту по площі поля, при описаному методі вимірювання, не відповідає дійсності. Звичайно, більш досконаліми є твердоміри на тензодатчиках, проте їх застосування вимагає дуже малої швидкості обробки поля.

В останні роки в Україні для виявлення ущільнених ділянок поля застосовуються цифрові технології (Rezaeva, 2017; Wijewardane et al., 2020), зокрема: GPS-пенетрометри (Lee & Byun, 2020; *First results...*, 2019), які за допомогою певних, встановлених на смартфон програм, відображають місце замірів та місцезнаходження того, хто робить заміри.

Чинні наразі методи й технічні засоби для визначення твердості ґрунту, або не дають змоги ефективно застосовувати технології координатного землеробства, тому що вимагають високих затрат ручної праці і часу на виконання масових вимірювань, або мають низьку достовірність результатів.

Отже, можна зробити висновок, що актуальним завданням сучасної науки є вдосконалення методів і технічних засобів, які дадуть змогу забезпечити безперервне пошарове масове вимірювання твердості ґрунту, і тим самим ефективно застосовувати технології координатного землеробства. До таких методів відноситься ультразвукове випромінювання (Antypchuk, 2018; Antypchuk & Mironenko, 2019).

Найбільш оптимальним на даний час для розв'язання проблеми ефективного розущільнення ґрунту є застосування пристроїв, які базуються на взаємодії ультразвукових коливань у ґрунті (Antypchuk, 2017), тому що затухання звукових хвиль у воді, осадових гірських породах та ґрунтах мізерне в порівнянні з електромагнітними хвилями. За швидкістю розповсюдження звукової хвилі в ґрунті можна зробити висновки про його механічні та фізичні властивості.

Матеріали і методи досліджень. Основними константами акустичної поведінки переущільненого шару ґрунту (плужної підшви) є такі інформативні параметри як: акустична жорсткість, яка показує залежність звукового тиску від амплітуди зсуву частинок середовища, та акустичний опір пластів ґрунту, який більш наочно

та узагальнено показує опір розповсюдженню звукової хвилі (Bschorr & Raida, 2020).

Плужна підшва через свій механічний та фізичний стан є абсолютно жорстким середовищем.

В акустиці взагалі не розглядаються абсолютно жорсткі тіла (середовища) через їхню нездатність пропускати звукову енергію. Проте, саме здатність плужної підшви не пропускати ультразвук, а швидко відбивати звукову хвилю, і дає всі підстави для проведення дослідження із застосуванням ультразвукового методу, адже для виявлення глибини залягання плужної підшви необхідно фактично виміряти відстань до неї на глибині.

В основу моделювання акустичного контакту ультразвуку з плужною підшвою (переущільнений шар ґрунту) з метою виявлення її глибини залягання використано методику В.А. Шутилова для проходження ультразвуку на межі розподілу двох твердих середовищ (Shutilov, 1980), проте дана модель розроблена з урахуванням специфіки акустичної поведінки плужної підшви та верхніх пластів ґрунту: їхня акустична провідність та швидкості розповсюдження звуку в них, їхній питомий хвильовий опір, коефіцієнт затухання (поглинання) ультразвуку різними видами ґрунтів, кути падіння, відбиття та заломлення ультразвукової хвилі.

Для проведення дослідження була розроблена експериментальна система оперативного керування глибиною ходу ґрунторозпушувача сільськогосподарського машинно-тракторного агрегату.

Проектування системи визначення глибини ущільненого шару ґрунту радіофізичними методами базувалося на розподілі її на конструктивні блоки. Для забезпечення надійності, універсальності, а також технологічності, спроектовану систему умовно було розділено на три функціональні блоки, а саме: приймально-передавальний пристрій випромінювання (УППВ), який містить у своїй будові систему датчиків для випромінювання та прийняття зондувальних ультразвукових імпульсів; електронний обчислювальний блок, який складається із генератора зондувальних імпульсів, приймача та мікроконтролера; блок керування, який містить дисплей.

Такий поділ є найбільш оптимальним, оскільки незалежно від будови та конструкції сільськогосподарського машинно-тракторного агрегату таку систему буде легко та раціонально встановлювати для забезпечення надійності роботи її основних робочих блоків, їхнього функціонування між собою, а також здійснювати її технічне обслуговування та за необхідності легко демонтувати.

На рисунку 1 наведено схематичне зображення розробленого мобільного вимірювального комплексу для безконтактного визначення щільності ґрунту.

Програма експериментальних досліджень радіофізичного пристрою визначення глибини залягання найбільш ущільненого прошарку ґрунту (ПВГП) включала проведення лабораторних та лабораторно-польових робіт, якими передбачалося:

- 1) визначення необхідних для аналізу аналітичної залежності фізичних характеристик ґрунту;
- 2) встановити залежності сигналу датчика ПВГП від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні в умовах одного типу ґрунту;

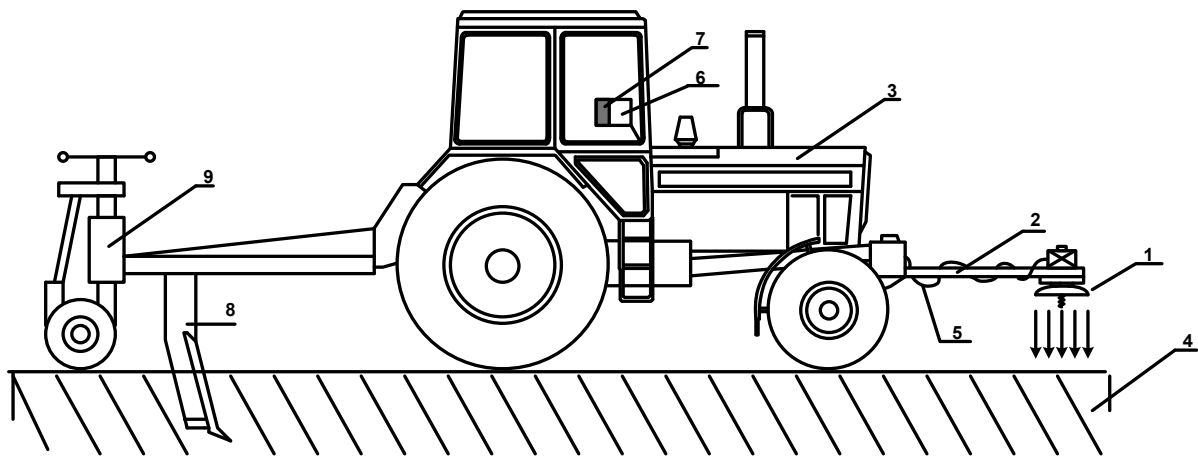


Рис. 1. Мобільний вимірювальний комплекс для безконтактного визначення щільності ґрунту:
 1 – ультразвуковий приймально-передавальний пристрій випромінювання (УППВ); 2 – рама; 3 – МТА;
 4 – ґрунт; 5 – система кабелів живлення та передачі інформації; 6 – електронно-обчислювальний блок;
 7 – блок керування; 8 – ґрунтообробний орган; 9 – заглиблювальний пристрій.

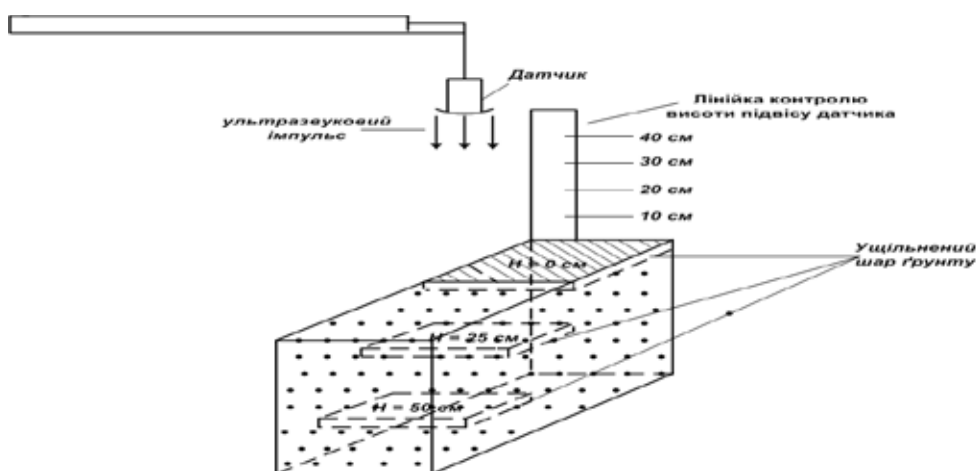


Рис. 2. Макет лабораторної установки для проведення досліджень ПВГП

3) вивчення впливу глибини залягання в ґрунті ущільненої поверхні на зворотній ультразвуковий сигнал датчика ПВГП;

4) встановити залежності сигналу датчика ПВГП від типу ґрунту (чорнозем, пісок, глина);

5) вивчення впливу вологості ґрунту (вологість визначалась за допомогою вологоміра МГ-44) на показники ПВГП;

6) оцінка впливу висоти установки датчика ПВГП над поверхнею ґрунту на його показники;

7) оцінка впливу швидкості проходження ПВГП над заданою смугою поверхні ґрунту на його покази;

8) виробнича перевірка технічної можливості і ефективності використання ПВГП в технологічному процесі розуцільнення ґрунту.

Метою проведення даного дослідження як в лабораторних, так і в лабораторно-польових умовах було підтвердження теоретичних доводів того, що акустична поведінка плужної підшви ідентична акустич-

ній поведінці абсолютно твердого (жорсткого) тіла (середовища), що надає змогу застосовувати ультразвук для визначення глибини залягання плужної підшви.

Ще одним головним завданням дослідження, яке проводилось, було з'ясування економічного ефекту, тобто: чи впливає застосування ПВГП на зменшення витрат палива при проведенні технологічної операції по розуцільненню ґрунту.

Дослідження в лабораторних умовах проводилось за допомогою двох приймально-передавальних пристроїв випромінювання (датчиків): одно- та двоканальним.

Об'єктами досліджень були спеціально створені фізичні моделі ґрунту з різними рівнями залягання ущільненого матеріалу (дерево, ґрунт) в лабораторних умовах (рис. 2, 3).

Дослідження проводилось за трьома основними змінними факторами: глибина залягання ущільненого шару ґрунту ($A(X_1)$), висота встановлення датчика над



Рис. 3. Установка датчика ПВГП на тракторі Т-150К

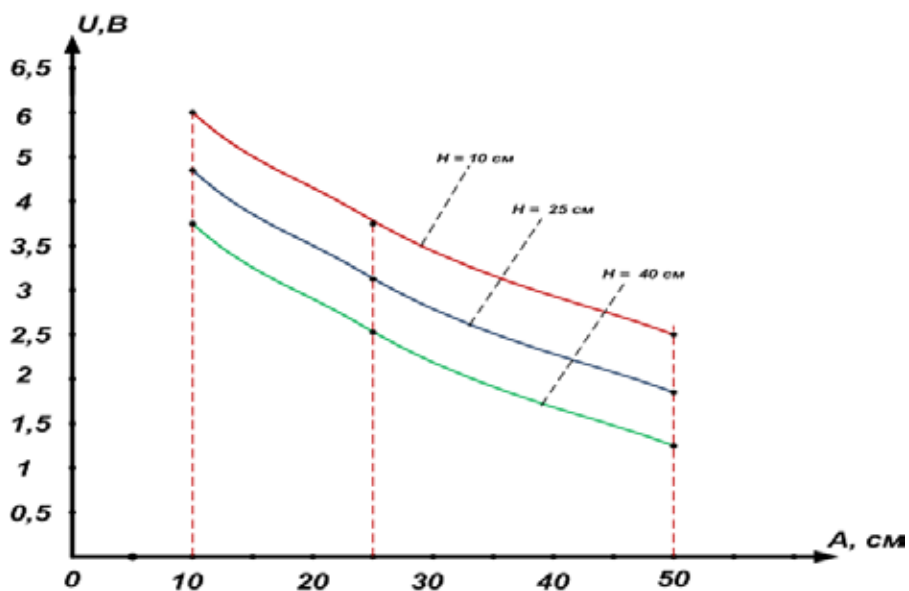


Рис. 4. Залежність показів ПВГП від глибини залягання ущільненого шару ґрунту

поверхню ґрунту ($H(X_2)$), вологість ґрунту ($\delta(X_0)$), ступінь вологості визначався у процентному співвідношенні (табл. 1).

Для визначення залежності показників датчика ПВГП від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні в умовах одного типу ґрунту передбачалось встановлення датчика пристрою (рис. 3, 4) на заданій висоті (0,4 м; 0,3 м; 0,2 м) над спеціальною пересувною платформою, в якій на глибині (0,05 м; 0,25 м; 0,5 м) закладені однакові дошки, що імітують його ущільнений прошарок, засипані однорідним ґрунтом. Переміщаючи платформу таким чином, щоб безпосередньо під датчиком знаходилася дошка на відповідній глибині, фіксувались покази ПВГП.

Таблиця 1

Змінні фактори дослідження	
Глибина залягання ущільненого шару ґрунту $A(X_1)$	
-1	50 см
0	25 см
+1	0 см
Висота встановлення датчика над поверхню ґрунту $H(X_2)$	
-1	40 см
0	25 см
+1	10 см
Вологість ґрунту $\delta(X_0)$	
-1	54%
0	42%
+1	31%

За відомою методикою визначається аналітична залежність величини сигналу датчика від глибини залягання ущільненого шару ґрунту (Ermolov & Ermolov, 2006; Shutilov, 1980):

$$U = kH, \text{ [8, с. 81]} \quad (1.1)$$

де U – тиск на приймачі (Па), k – коефіцієнт відбиття ультразвукової хвилі (%), H – глибина залягання ущільненого шару ґрунту (см).

Значення виміряних глибин залягання ущільненого прошарку ґрунту знімалися з інформаційного табло мікропроцесорного блоку управління.

Результати. Результати визначення показів ПВГП ($U, \text{м}$) від глибини залягання контрольної ущільненої поверхні ($H = 0,05 \text{ м}; 0,25 \text{ м}; 0,5 \text{ м}$) в умовах одного типу ґрунту при встановленні датчика на заданій висоті ($h = 0,4 \text{ м}; 0,3 \text{ м}; 0,2 \text{ м}$) представлені на рис. 4.

Аналіз одержаних результатів досліджень показує, що зі збільшенням глибини залягання ущільненого шару ґрунту збільшується похибка вимірювання (для глибини 0,25 м – від 4 до 14%, для глибини 0,5 м – від 6 до 16%). Той факт, що із збільшенням глибини залягання плужної підшви збільшувалась похибка вимірювання, свідчить про те, що через акустичний опір верхніх пластів ґрунту, знижувався коефіцієнт пропускання звукової енергії з одного шару в інший через енергетичні втрати звукової хвилі. Отже, чим глибше залягає переущільнений пласт ґрунту, тим більша похибка вимірювання.

Проведені лабораторні дослідження, а особливо польові, показали, що чим вище над поверхнею ґрунту розміщено ультразвуковий датчик, тим гірший сигнал, що реєструється. Це пов'язано з негативним впливом на ультразвуковий імпульс, що випромінюється, повітря та його температури (а в польових умовах ще

й вітру). Найбільш точні вимірювання були досягнуті при установці датчика на висоті 20 см (похибка становила 4–6%), а із збільшенням висоти установки похибка збільшувалась (рис. 5).

Результати визначення показів ПВГП глибини залягання контрольної ущільненої поверхні (0,5 м) в умовах одного типу ґрунту різної вологості (31%, 42%, 54%) при встановленні датчика на заданій висоті (0,4 м; 0,3 м; 0,2 м) представлені на рис. 6. Похибка вимірювань становила до 18%, тобто наявність у ґрунті води спричиняє часткове затухання звукової хвилі (зменшується її швидкість): чим вологіший ґрунт, тим слабше сигнал, який надходить до приймача, і якщо плужна підшва знаходиться на максимальній для неї глибині залягання (50 см), а верхній пласт ґрунту надто вологий, то сигнал може бути надто слабким, що призводить до неправдивих даних вимірювань.

Одним із завдань лабораторного дослідження було встановлення залежності сигналу датчика ПВГП від типу ґрунту. Датчик ПВГП встановлювався на висоті 0,2 м над спеціальною пересувною платформою. В пересувну платформу закладався по черзі ґрунт трьох типів: пісок, чорнозем та глина, на глибині 0,4 м закладались однакові дошки. Переміщаючи платформу таким чином, щоб під датчиком знаходилося відділення з тим, чи іншим ґрунтом, фіксувалось значення сигналу датчика. У результаті проведеного випробування було встановлено, що ці три типи ґрунту мають абсолютно різну ультразвукову пропускну спроможність (рис. 7).

Коли закладали на глибину 20 см дерев'яну дошку, імітуючи ущільнений шар, найшвидше сигнал повертався до датчика від піску, слабшим був сигнал від чорнозему, а при скануванні глини сигнал був ще гіршим. Без імітації ущільнення, сигнал до приймачів не повертався від жодного типу ґрунту, тобто хвиля затухала і в піску, і в чорноземі, і в глині.

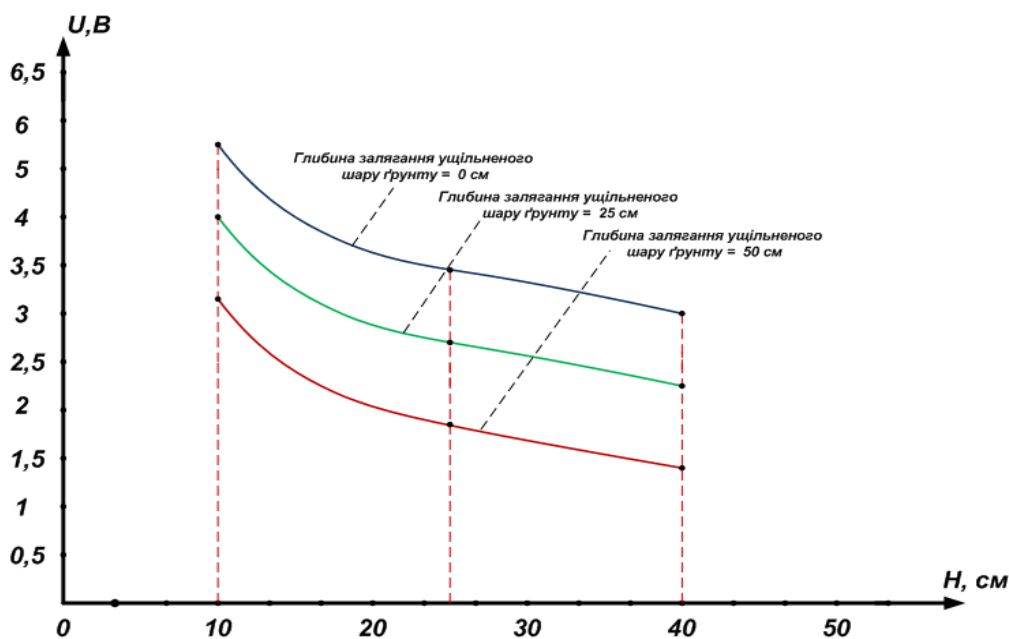


Рис. 5. Залежність сигналу датчика (U) від висоти його встановлення над поверхнею ґрунту

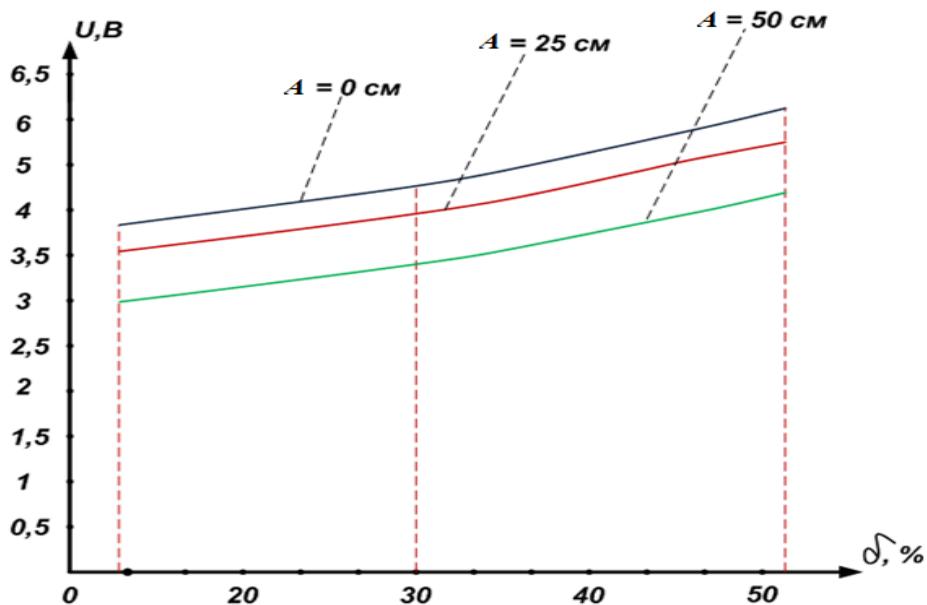


Рис. 6. Залежність показів ПВГТ від вологості ґрунту

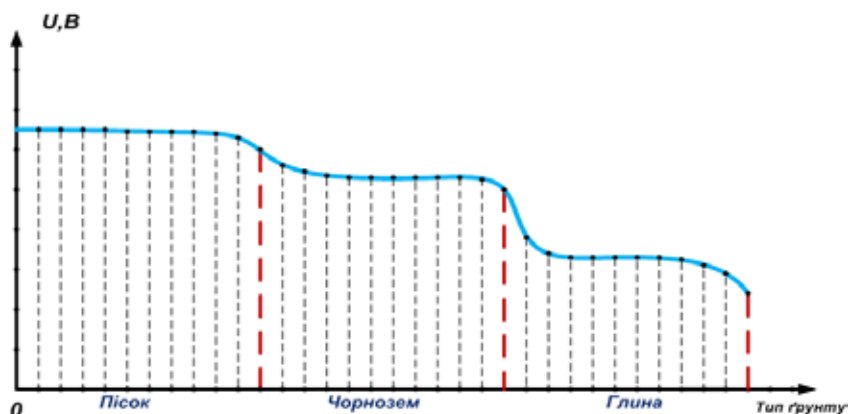


Рис. 7. Встановлення залежності сигналу датчика від типу ґрунту

Проте для нашого дослідження така поведінка ультразвуку з різними типами ґрунтів особливого значення не має, тому що основна мета – це виявлення плужної підшви, а її акустична поведінка однакова для будь-якого типу ґрунту, крім піску, де хвиля завжди затухає.

Обговорення. Враховуючи те, що донині ультразвук не застосовувався для визначення щільності ґрунту під час руху МТА, було прийнято рішення випробувати розроблений пристрій з одним датчиком, який випромінював і приймав відбитий сигнал. Після проведення перших лабораторних досліджень, які здійснювались ультразвуковим приймально-передавальним пристроєм випромінювання (УПППВ) з одним каналом, отримавши досить непогані результати, але, врахувавши всі об'єктивні фактори, пов'язані з механічними та фізичними властивостями ґрунтів, а також, беручи до уваги природний стан ґрунтів, зважаючи на те, що ґрунт, особливо в польових умовах – надзвичайно складне для проходження ультразвуку, з неоднорідною поверхнею середовище,

було прийнято рішення вдосконалити датчик (рис. 8), додавши два додаткових елементи, які будуть призначені лише для приймання відбитих сигналів. Тобто один елемент датчика випромінює і приймає сигнал, а два інші – лише приймають, що дало б змогу реєструвати найсильніший сигнал, що відбився від поверхні ґрунту.

Після встановлення двох додаткових елементів пов усіх чотирьох параметрах лабораторного дослідження: глибина залягання плужної підшви, висота встановлення датчика над поверхнею ґрунту, вологість ґрунту, тип ґрунту, прийнятий датчиком сигнал став якіснішим. Похибка вимірювання загалом зменшилась на 1–3%, а при зволоженому ґрунті становила 14–16%. Прийнятною також стала висота встановлення датчика до 25 см.

Висновки. Алгоритм роботи УПППВ полягає в тому, що він виводить на блок індикації тільки ті відбиті сигнали, глибина яких при двох послідовних вимірах змінилась не більше ніж на 2% від заданої межі зондування, яка, до речі, не перевищує 4 метри. Це дає змогу від-

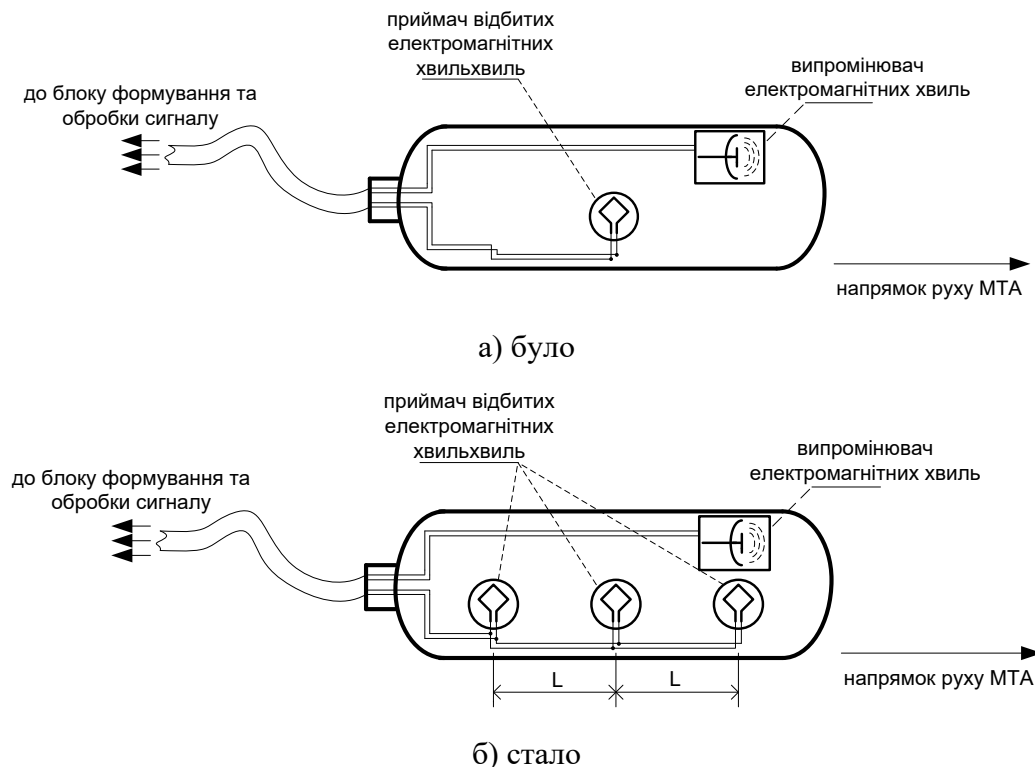


Рис. 8. Вдосконалення конструкції датчика визначення глибини залягання ущільненого шару ґрунту

сіяти перешкоди, які здійснюватиме, наприклад, двигун самого машинно-тракторного агрегату.

При збільшенні глибини залягання ущільненого шару ґрунту збільшується похибка вимірювання (для глибини 0,25 м – від 4 до 14%, для 0,5 м – від 6 до 16%).

Найбільш точні вимірювання були досягнуті при установці датчика на висоті 20 см.

Похибка вимірювання після встановлення на УПППВ двох додаткових елементів загалом зменшилась на 1-3%, а при зволоженому ґрунті становила 14–16%. Прийнятною також стала висота встановлення датчика до 25 см.

Значення визначених глибин залягання ущільненого прошарку ґрунту ультразвуковим пристроєм і твердоміром Ревякіна відрізнялися від –9,4 до +16,4%.

Бібліографічні посилання:

1. Antypchuk, B.O. (2018). Zalezhnist tochnosti vymiru hlybny zaliahannia pluzhnoi pidoshvy vid vysoty vstanovlennia ultrazvukovoho datchyka-peretvoriuvacha nad poverkhneiu hruntu [Dependence of accurate measurement of solid soil depth on the height of sensor installation above the soil]. International Multidisciplinary Conference "Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland" (19–20 October 2018). Wolomin: Baltija Publishing, V. 1, pp. 86–89 (in Ukrainian)
2. Antypchuk, B.O. (2017). Ultrazvukovi eksperymentalnyi prystrii – osnovnyi element avtomatyzovanoi systemy keruvannia polozhenniam hruntorozpushuvacha [Ultrasonic experimental device – the main element of the automated control system of soil rake position]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : zahalnoderzh. mizhvidomch. nauk.-tekhn. zb.* [Design, production and operation of agricultural machinery: national interdepartmental scientific and technical collection]. Kropivnitskiy: CSTU, V. 47, Part 1, pp. 47–51. (in Ukrainian)
3. Antypchuk, B., Mironenko V. (2019). Modeling of definition of a depth of the condensed soil layer ultrasound and formation of an acoustic signal. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph.* Riga: Baltija Publishing, pp. 1–19. doi:10.30525/978-9934-588-15-0-48
4. Ahmed, M. (2020). Advances in Projectile Penetration Mechanism in Soil Media. *Applied Sciences*, No. 10, pp. 1–28. doi:10.3390/app10196810
5. Ahrens, C.J., Paige, D.A., Eubanks, T.M., Blasé, W.P., Mesick, K.E., Zimmerman, W., Petro, N., Hayne, P.O., Price, S. (2021). Small penetrator Instrument Concept for the Advancement of Lunar Surface Science. *The Planetary Science Journal*, V. 2, No. 1, pp. 1–11. doi:10.3847/PSJ/abda4f
6. Bschorr, O., Raida, H.-J. (2020). One-Way Wave Equation Derived from Impedance Theorem. *Acoustics*, V. 2(1), pp. 164-170. doi:10.3390/acoustics2010012
7. Ebato, M. (2020). Evaluation of Soil Hardness in Paddy Fields by Cone Penetrometer as a Simple Soil Physical Diagnosis Method. *Agricultural Information Research*, V. 29(1), pp. 24–39. doi:10.3173/air.29.24
8. Ermolov, I.N., Ermolov, M.I. (2006). *Ultrazvukovoi kontrol: navch. posib.* [Ultrasonic inspection: a textbook]. Moscow: Azimuth, 208 p. (in Russian)

9. Pershi rezultaty proektu «tsyfrova tekhnolohiya zemli» [First results of the “digital earth technology” project]. (2019). Proposition, No. 11 (290), pp. 170–174 (in Ukrainian)
10. Gogolinskiy, K.V., Syasko, V.A., Umanskiy, A., Nikazov, A., Bobkova, T. (2019). Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects. Journal of Physics Conference Series, V. 1384(1), pp. 1-7. doi:10.1088/1742-6596/1384/1/012012
11. Hashemi M., Nikudel, M.R. (2016). Application of Dynamic Cone Penetrometer test for assessment of liquefaction potential. Engineering Geology, V. 208, pp. 51-62. doi:10.1016/j.enggeo2016.04.013
12. Heric, J.E., Jones, T.L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, V. 66. pp. 1320–1324.
13. Latvala, J., Luomala, H., Kolisoja, P. (2020). Determining Soil Moisture Content and Material Properties with Dynamic Cone Penetrometer. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, V. 15(5), pp. 136–159. doi:10.7250/bjrbe.2020-15.511
14. Lee, Jong-Sub, Byun, Yong-Hoon (2020). Instrumented Cone Penetrometer for Dense Layer Characterization. Sensors, V. 20(5782), pp. 1–19. doi:10.3390/s20205782
15. Rezaeva, A. (2017). Design, construction and evaluation of a digital hand-pushed penetrometer. International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems (IJASSN), V. 7, No. 1, pp. 1–10. doi:10.5121/ijassn.2017.7101
16. Saye, S. R., Kumm, B. P., Lutenecker, A. J. (2020). Estimating the OCR in Uniform Cohesive Soil with Cone Penetrometer Tests Considering Soil Structure and Index Properties. Canadian Geotechnical Journal, No. 10, pp. 1-48. doi:10.1139/cgj-2020-0293
17. Shutilov, V.A. (1980). *Osnovy fiziki ultrazvuka [Fundamentals of Ultrasound Physics]*. Leningrad: Leningrad University, 280 p. (in Russian)
18. Surdu, M.M., Mognevsky, V.M., Lameco, O.L., Lastovchenko, O.M. (2002). *Vymiruvach tverdosti, volohy ta temperatury gruntu [Soil hardness, moisture and temperature meter]*. Science Book of NAU “Mechanization of agricultural production”, No. 129, pp. 135–138 (in Ukrainian)
19. Thiel, D., Worsey, M., Klodzinski, F., Emerson, N., Espinosa, H. (2020). A Penetrometer for Quantifying the Surface Stiffness of Sport Sand Surfaces. Proceedings, V. 49(64), pp. 1–6. doi:10.3390/proceedings2020049064
20. Vakili, A.H., Salimi, M., Shamsi, M. (2021). Application of the dynamic cone penetrometer test for determining the geotechnical characteristics of marl soils treated by lime. Heliyon, V. 7(9), pp. 1–7. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08062
21. Vashko, A., Sovik, J., Krynke, M. (2019). Determination of accuracy and reliability of portable hardness testers. Quality Production Improvement – QPI, V. 1(1), pp. 289–295. doi:10.2478/cqpi-2019-0039
22. Wijewardane, N.K., Hetrick, S., Ackerson, J., Morgan, C.L. S.; Ge, Y. (2020). VisNIR integrated multi-sensing penetrometer for in situ high-resolution vertical soil sensing. Soil and Tillage Research, V. 199, pp. 1–10. doi:10.16/j.still.2020.104604

Antypchuk B. O., Zhytomir agrotechnical professional college, Zhytomir, Ukraine

MODERN SOIL DENSITY MEASURES: A REVIEW AND STUDY OF USING ULTRASOUND FOR OPERATIVE DEFINITION OF A COMPACTED AREA OF A CULTIVATED FIELD

The changes taking place in the agro-industrial complex require the development and creation of new implements and machines and the improvement of existing ones. This, in turn, is possible only when considering the cultivation of the soil as an addition to the natural processes of formation of the soil itself, taking into account the biological, physical and mechanical properties, as well as reducing energy costs for its processing, as agro technical activities of the basic cultivation of the soil from an economic point of view is the most energy-consuming among the whole complex of technological operations of growing and harvesting crops. Therefore, the problem of creating energy-saving technologies and technical means of tillage that contribute to this preservation is nothing but a problem of ecological and energy importance, which cannot be solved simply by reducing the depth of tillage.

Thus, to solve these issues, it is necessary to apply more advanced methods of cultivation, in particular loosening the soil. It is important to provide technical support for this technological operation in modern crop production in order to incur the lowest energy costs and increase crop yields.

The article analyzes the existing modern devices for measuring soil density in the mode of continuous registration: penetrometers, penetrometers, digital hardness meters, GPS penetrometers, and also considers the issue of using ultrasound to detect compacted areas of the cultivated field. Acoustic behavior of dense soil and its basic acoustic constants are considered: acoustic stiffness and acoustic impedance.

The main results of the conducted research on the basis of the developed model of the operational system to determine the depth of a compacted layer of soil using the radio physical method of studying the mechanical and physical properties of the soil, which are based on ultrasound radiation, the method of continuous radio-wave profiling in motion, that is, the tractor unit at the moment of the field, the method of synthesis of technical means, the theory of automatic control with application of the ultrasound device to determine the depth of the dense soil layer.

The analysis of the obtained results using a sensor with one and two channels of the receiving and transmitting path is carried out. The optimal height of the sensor installation above the ground surface is investigated.

Key words: penetrator, penetrometer, soil ripper, density meter, ultrasound, radio physical device, sensor, dense soil, receiving and transmitting radiation device, acoustic conductivity.

Дата надходження до редакції: 09.12.2021 р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧИСТОТИ ПОСІВНОЇ БОРОЗНИ НА ВРОЖАЙНІСТЬ ПРИ ВИРОЩУВАННІ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО

Зубко Владислав Миколайович

доктор технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-2426-2772

vladislavzubko@ukr.net

Серед великого різноманіття агрокультур, які вирощуються в полях натепер, значне місце посідає кукурудза. Розповсюдження цієї культури зумовлене заявленими на неї попитом. Тому сьогодні кукурудза стає однією з передових агрокультур, які вирощуються у різних країнах та континентах.

Одним із основних процесів вирощування культур у загальній технології є забезпечення якісної сівби.

Сьогодні все більш розповсюдженими стають технології, які використовують усілякі датчики для контролю проведення сівби та посіву агрокультур.

Одним із основних виробників сучасного обладнання для проведення посіву є Precision Planting та John Deere. У їхньому арсеналі існує певна кількість систем для забезпечення оптимального посіву, основними з яких на сьогодні є:

- сингуляція насіння на висівних апаратах vSet;
- застосування притискачів насіння Keeton;
- застосування мульчувальної плівки;
- застосування системи Clean Sweep;
- швидкісна сівба кукурудзи за допомогою системи Speed Tube;
- застосування системи Delta Force;
- застосування системи vDrive;
- сошники Farrow Jet.

У роботі досліджено ефективність використання системи Clean Sweep при проведенні сівби. Управління пожнивними рештками на сьогоднішній день стало дуже важливою операцією для максимізації прибутковості. Жорсткі стебла та повторний посів кукурудзи по кукурудзі створюють достатньо високу густину рештків. Кількість залишків може впливати на вологість та на швидкість прогрівання ґрунту навесні. Рештки рослин можуть містити захворювання, які завдають ушкодження молодим сходам. Тому очищувачі рядків повинні видалити їх із сім'яложа.

Якщо рештків досить багато, можна посилити тиск на очисники, щоб прибрати сміття. Якщо рештків мало або ґрунт занадто м'який, можна послабити тиск на очищувачі, щоб вони плавали зверху.

При дослідженні використана нова методика аналізу ефективності проведення сівби «Методика прапорців». У результаті проведених досліджень отримано вплив на врожайність рослинних залишків, що залишаються у борозні під час посіву. Проведеними дослідженнями встановлена ефективність використання системи регулювання притискового зусилля розгортачів післяжнивних решток Clean Sweep.

На основі аналізу проведених досліджень, обчислено масу качанів під час збирання врожаю і отримано залежність дружності і рівномірності сходів кукурудзи на зерно на врожайність, на якому показано втрати врожаю внаслідок затримки появи сходів у кожній категорії.

Ключові слова: сівба кукурудзи, якість посіву, рослинні рештки.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.2>

Постановка проблеми у загальному вигляді

Обробка рослинних рештків після проведення збирання врожаю кукурудзи дуже важлива з кількох основних причин. Рослинні рештки є одним із основних джерел органічних добрив, тому не можна залишати їх у полі без належної уваги, аналізу та роботи з ними. Пожнивні рештки на полі можуть бути розподілені нерівномірно, це значно ускладнює наступний обробіток ґрунту, при цьому утворені валки сприяють активному розмноженню шкідників та поширенню хвороб. Активна робота з пожнивними рештками можна проводити з використанням мульчера або штригельної борони [Zosymchuk, 2021].

Важливою відмінністю технологій вирощування є спосіб заробки пожнивних рештків. Вони істотно впливають на досягнення оптимального контакту між ґрунтом

та насінням. Якщо рештків багато, у такому випадку їх потрібно заробляти глибоко, щоб не утворювались перешкоди при сівбі наступної культури, при цьому в той же час створювати якнайсильніше їх подрібнення і перемішування з ґрунтом. Тип залишків, а саме: попередник визначає ступінь швидкості розкладання і наскільки ефективно вони оброблені технікою [Vaderstad, 2021].

У сучасних реаліях України дисбаланс гумусу на наших колись родючих полях є істотно більш негативним. Це з погляду на весь обсяг кількості внесених у поле органічних добрив. При цьому у кращі роки попереднього періоду у практиці на один гектар поля вносили орієнтовно до 10 т органічного добрива різного складу, не покриваючи цим можливостей агрокультур при тих рівнях врожайності рослин. Зараз базовою статтею над-

ходження у ґрунт свіжої органічної складової є поживні рештки агрокультур, які ми вирощуємо. Але за великих обсягів вирощування агрокультур і залишення рештків на полі дуже ускладнюється робота агротехніки в цілому [Makhdi al-Kaisa, 2020].

При цьому слід зауважити, що найбільший вплив вони мають саме на якість проведення сівби. Розглядаючи якість сівби, слід говорити, як раз про контакт ґрунту з насінням. Велика кількість рослинних рештків створює серйозні перешкоди потрапляння до насіння вологи і поживних речовин.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Сівалка є однією з найдавніших машин у землеробстві, котру використовують для проведення сівби насіння у середовище. Порівнюючи з раніше існуючим ручним розкидним способом сівби насіння використання сівалки дозволяє зменшити витрату посівного матеріалу на 30%, при цьому досягти економії часу і затрати праці. Також перевагою механізації сівби є забезпечення точної і рівномірної глибини загортання посівного матеріалу, це дозволяє зберегти їх від впливу вітру, знищення шкідниками, гризунами, птахами і в результаті отримати якісні і дружні сходи.

Перше примітивне устаткування у вигляді насіннеповоду, частково допомагало полегшити ручну важку працю і потім стало прообразом посівної машини, використовувалося вавилонянами аж у 1400-х роках до н. е. Досліджуючи археологічні знахідки у Китаї, що датуються приблизно початком 200-х років в н. е. (Час правління династії Лю, імперії Хань), вчені встановили, що у той же час роботи з сівби проводилися дерев'яною сівалкою з використанням декількох насіннепроводів у вигляді залізних труб. Її автором був чиновник Чжао Го. Експлуатуючи вказану сівалку, можна було посіяти площу у межах 7 га на день. Рушієм в подібних сівалках служили буйволи або воли. Винахід дозволив у Китаї досягти значного підвищення продуктивності у рослинництві і істотно підвищити продуктивність вирощування агрокультур, потрібних для забезпечення їжею великого населення імперії на протязі багатьох тисячоліть.

Селянами Індії посівні машини використовувалися повсюдно уже починаючи з XVI століття, у період існування імперії «Великих Моголів». Так у Європі перша посівна машина, яку, згідно з документами, було винайдено Камілло Торелло, і запатентована у Венеціанському Сенаті вже у 1566 р. Конструкція сівалки була ще досить нестабільною і ненадійною. Пошуки більш досконалих рішень сівалок велися на протязі дуже тривалого часу, і орієнтовно до 1700 року з'явилися досить ефективні і надійні конструкції. У період Британської аграрної революції у Англії, агроном Джетро Талл презентував свою модель сівалки з використанням кінної тяги, за допомогою якої насіння по металевим насіннепроводі, оснащеним нижнім клапаном, потрапляли в землю рівномірно, рівними рядами.

Характерною особливістю створення сівалок є те, що навіть після створення сівалок Талла ручний спосіб сівби насіння залишався в роботі ще не менше століття. Активне використання посівних машин почалося в сере-

дині XIX століття, в час, коли досягли високого рівня розвитку галузі промислові металургія (штампування металу та кування) і машинобудування (верстати, що забезпечували випуск великогабаритних точних металевих деталей). Прогрес у науці і техніці дозволив зробити виробництво посівних машин досконалим і економічно вигідним.

Малогабаритні вузькорядні сівалки, які приводяться в роботу від кінської сили, які в землеробських господарствах переважали до 1930-х років, при запуску у роботу тракторів, замінювались широкорядними посівними машинами з більшою продуктивністю та з більшими габаритами. Робоча ширина захвату сівалки – це один з найважливіших показників її роботи, який вказується у модифікації її маркування. Чим вища ширина захвату смуги, тим більша продуктивність машинного агрегату, тим менше часу витрачається, щоб провести сівбу на такій же площі поля.

Залежно від типу тягової сили, яка приводить посівну машину в рух, існують:

- кінні та ручні сівалки, які вже втратили актуальність у сучасному агровиробництві;
- тракторні, які поділяються на навісні, напівнавісні та причіпні;
- самохідні сівалки.

В аграрному секторі на сьогоднішній день найбільшого поширення здобули тракторні сівалки, які за своїм призначенням можна поділити на:

- **універсальні**, які використовують для сівби зернових, зернобобових, технічних, олійних культур, кормових трав та інших; їх використовують для розкидання добрив порошкоподібної або гранульованої форми та вапна;
- **спеціальні** використовуються для сівби культур одного будь-якого визначеного виду або декількох з них;
- **комбіновані**, обладнані, окрім насінневого апарату, ще й туковисівним, при цьому вони можуть здійснювати одночасно посів і внесення в ґрунт і добрив.

Сівалки відрізняються і за способом сівби, який визначається у залежності від типу і гібриду чи сорту агрокультури, особливостей її вегетації, від ґрунтового-кліматичних умов вирощування. Згідно з цією класифікацією у агрономії вирізняють сівалки за типом: рядові, пунктирні, квадратно-гніздові та розкидні.

Рядовий – це спосіб сівби, за якого насіння з кожного насіннепровода висіваються у ґрунтового середовище на однакову глибину рівними рядами з точно визначеним міжряддям. У сучасних умовах це основний спосіб сівби агрокультур. Він використовується для зернових агрокультур при суцільній сівбі і для просапних (рядковий, широкорядний, стрічковий).

Для цього типу сівби ширина міжрядь складає від 10 см до 25 см. Цей спосіб найчастіше застосовується для сівби зернових культур. При великих посівних площах встановлюється ширина міжрядь на рівні 12,5–15 см, а крок між насінням в ряду повинен становити не більше 1,5 – 2 см. Необхідно забезпечити майбутні рослини кращим доступом світла, вологи, збільшити площу живлення, також часто застосовується рядова перехресна сівба, коли 50% норми висіву сіють

уздовж, а 2-гу частину – у поперек рядів поля. При цьому такий спосіб сівби має недоліки:

- трудозатрат,
- збільшення збільшуються терміни посіву,
- зростає перевитрата палива,
- проходження трактора дворазове,
- нерівномірність сівби в місцях перетину рядів.

Існує перехресно-діагональний спосіб сівби як один з варіантів перехресного рядового.

Рядовий вузькорядний посів – це крок між посівним матеріалом в ряду збільшується до 3–4 см, таким чином менше загушення посіви в рядах, при цьому більш вузька ширина міжрядь (на рівні 7–10 см).

При такому способі ширина міжрядь зростає до 90 см, за рахунок чого агрокультура забезпечуються збільшеною площею живлення. Цей спосіб застосовується для посіву просапних культур, які вимагають додаткового внесення добрив і обробки ЗЗР в період вегетації.

Рядковий або стрічковий спосіб сівби відрізняється від просто рядового шириною міжряддя (30–40 см). Таке міжряддя дає можливість проведення передпосівного обробітку ґрунту: розпушування і додаткових обробок при засміченості посівних площ. Рядковий або стрічковий спосіб посіву застосовується для сівби моркви, цибулі, проса, буряку та інших культур, наприклад деяких видів лікарських рослин.

Гніздовий або квадратно-гніздовий спосіб, суть якого полягає в сівбі насіння групами, які рівновіддалені одна від одної у рядках. При цьому якщо в простому гніздовому способі ці групи відносно один одного зміщуються в кожному новому проході посівної машини, то при квадратно-гніздовому вони розташовуються чітко у вершинах умовних квадратів визначеного розміру. Такий спосіб виконувався фахівцями високої кваліфікації і застосовувався рідко, однак дозволяє проводити обробіток ґрунту в будь-якому напрямку, використовуючи спеціальні механізми і спец техніку.

Однозерновий або пунктирний спосіб посіву проводиться спеціальними сівалками з великою шириною при точному висіві і забезпечує незагущені, рівномірні сходи, як результат це не вимагає додаткових робіт по їх обробітку (проріджуванню). Такий спосіб досконаліший, ніж рядовий. Застосовується для висіву буряків, соняжу, кукурудзи та інших культур.

Використовуються і розкидні сівалки для посіву насіння і для розсіювання добрив по полю.

За своєю будовою всі сівалки схожі. Вони оснащені такими основними елементами і вузлами: бункер для насіння, висіваючий апарат, насіннепроводи, сошники і притискачі пристосування. При цьому сівалки відрізняються за сошниками (дискові, котки, бороздоутворювачі, лемішного типу), виду насіннепроводів (спіральні-дротові, трубчасті, гофровані, воронкоподібні, спіральні-стрічкові) принципу роботи дозуючих апаратів (механічний, пневматичний) та інших особливостей устаткування.

При обґрунтуванні потрібної моделі сівалки слід враховувати надійність в експлуатації, простоту і економіч-

ність при обслуговуванні, продуктивності, якості і точності виконання сівби.

Задача дослідження – оцінювання впливу на врожайність рослинних рештків, що залишаються у борозні під час посіву (рис. 2). Залишки старих агрокультур у посівній борозні можуть перебирати на себе від насіння вологу та поживні елементи, утворювати капіляри та погіршувати контакт посівного матеріалу з ґрунтом. Усі ці чинники суттєво погіршують врожайність кукурудзи на зерно та сповільнюють її проростання. У проведеному дослідженні буде проаналізовано вплив дати проростання, а саме: кількісно оцінено втрати урожайності при різній кількості післяжнивних залишків у насінневому ложі під час посіву.

Застосування системи регулювання притискного зусилля розгортачів післяжнивних решток Clean Sweep.

Основна мета розгортачів післяжнивних решток, обладнаних системою Clean Sweep, є очищення рядків від післяжнивних рештків агрокультур стало обов'язковим процесом при роботі сучасної техніки проведення сівби для підвищення рентабельності роботи. Через збільшення площ та знаходження на їх поверхні масивних стебел, на яких кожного року вирощують кукурудзу, зростає кількість рослинних залишків, які необхідно подрібнювати та видаляти з посівної борозни. Рештки, що потрапили в посівне ложе, забирають на себе вологу і стають прихистником для збудників хвороб. Система Clean Sweep заглиблює встановлені розгортачі післяжнивних рештків саме туди, куди вони мають бути, для того щоб відгортати рослинні залишки, а не ґрунт. Зі зміною польових умов тракторист може змінювати положення цих розгортачів за допомогою встановлених регуляторів, розташованих у кабіні трактора, легко заглиблюючи їх ще більше чи підіймаючи їх.

Другий етап проведення досліджень – вплив дружності і рівномірності сходів кукурудзи на зерно на врожайність.

Методика досліджень та обговорення результатів

Основна мета дослідити вплив дружності появи сходів кукурудзи на врожайність. Для контролю дати появи сходів використовувався «метод прапорців» (рис. 1). Коли рослина починала з'являтися над поверхнею землі, біля неї встановлювали прапорець. Для позначення періоду сходження рослин використовували прапорці чотирьох різних кольорів.

На рис. 1 бачимо нерівномірність сходів рослин, що позначено різнокольоровими прапорцями.

У дослідженні впливу на врожайність рослинних залишків, що залишаються у борозні під час посіву проаналізовано вплив дати проростання, а саме: кількісно оцінено втрати урожайності при різній кількості післяжнивних залишків у насінневому ложі під час посіву (рис. 2).

Аналізом встановлено, що існує конкретна залежність врожайності кукурудзи на зерно від кількості решток агрокультури, яка описується рівнянням: $y = 0,3422x + 63,459$, з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9471$.

Встановлено, що на кожен 1% зменшення чистоти борозни врожайність зменшувалась на 0,45 ц/га. Урожайність кукурудзи змінювалась від 85 до 98 ц/га, тобто



Рис. 1. Контроль дат появи сходів з використанням «методу прапорців»

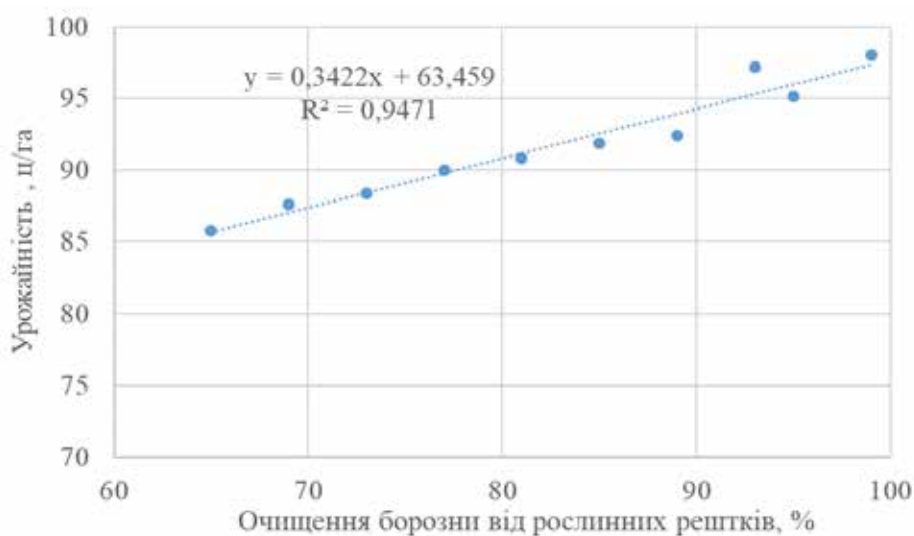


Рис. 2. Вплив на врожайність рослинних залишків, що залишаються у борозні під час посіву

втрати внаслідок великої кількості рештків у борозні сягали 13 ц/га.

Особливістю експерименту є те, що у ньому рештки вкладались таки чином, щоб вони знаходились в безпосередньому контакті з посівним матеріалом. Жодних інших рослинних залишків, рівномірно розподілених по всій борозні, не було. У типових польових умовах залишки, як правило, розподіляються по всьому посівному ложі, за рахунок чого їх кількість є значно більшою, що призводить до істотного збільшення втрат врожайності.

Під час проведення досліджень нами не враховувався ступінь подрібнення рослинних залишків та порушення цілісності їх стебла робочими органами агротехніки.

Отримані результати мають практичну спрямованість. Неякісний обробіток ґрунту після попередника, зміна ґрунтово-кліматичних умов, зниження рівня біоти у ґрунті значно впливають на інтенсивність перегнивання залишків після попередника. Маючи результати досліджень фермер планує як провести основний обробіток ґрунту і яким чином використовувати посівні машини для отримання оптимального врожаю.

Дослідження ефективності використання системи регулювання притискного зусилля розгортачів післяжнивних решток Clean Sweep (рис. 4) представлено на рисунку 3.

Дослідження проводились з використання гібриду Dekalb. Аналізом встановлено, що відсутність розгортачів післяжнивних решток призвела до втрат урожайності 1,4 ц/га, а відповідні економічні втрати, при закупівельній ціні 7500 грн/т, становили 1050 грн/га, порівняно з застосуванням розгортачів, обладнаних системою Clean Sweep. Застосування звичайних розгортачів плаваючої конструкції також призвело до втрат урожайності 31,7 ц/га і відповідних збитків у 1275 грн/га.

Другий етап проведення досліджень – вплив дружності і рівномірності сходів кукурудзи на зерно на врожайність (рис. 5).

На основі аналізу проведених досліджень, обчислення маси качанів під час збирання врожаю було побудовано рис. 5, на якому показано втрати врожаю внаслідок затримки появи сходів у кожній категорії. Через нестандартні погодні умови цього року рослини, що зійшли найпізніше, втратили до 20% врожайності (рис. 6). Рослини,

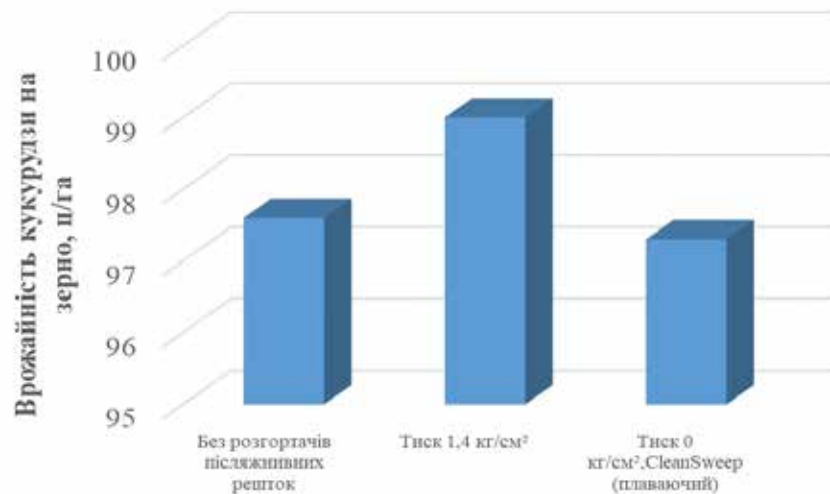


Рис. 3. Дослідження ефективності використання системи регулювання притисного зусилля розгортачів післязливних решток Clean Sweep



Рис. 4. Вид борозни після застосування системи Clean Sweep.

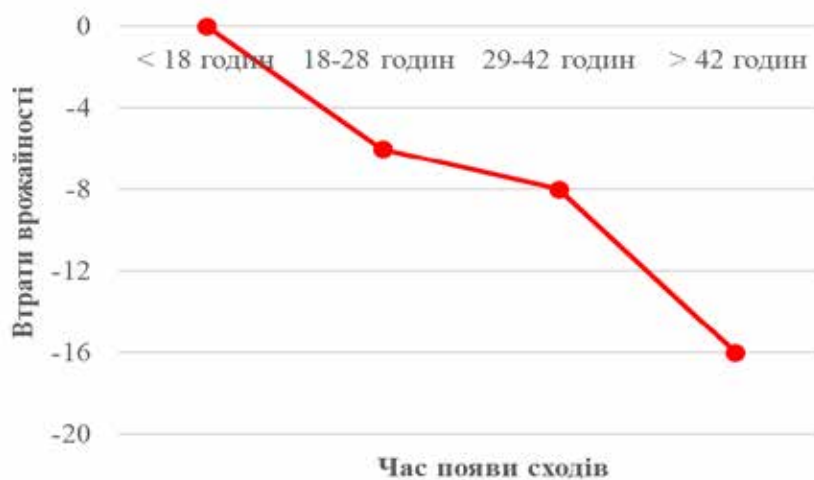


Рис. 5. Вплив дружності і рівномірності сходів кукурудзи на зерно на врожайність



Рис. 6. Розмір качанів у рослин за появою сходів

що зійшли у період від 18 до 28 годин після перших сходів, зазнали втрат у 6,5%, а в період від 29 до 42 годин – 8%.

Висновки:

1. Доведено, що існує конкретна залежність врожайності кукурудзи на зерно від кількості решток агрокультури, яка описується рівнянням: $y = 0,3422x + 63,459$, з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9471$.

Встановлено, що на кожен 1% зменшення чистоти борозни врожайність зменшувалась на 0,45 ц/га. Урожайність кукурудзи змінювалась від 85 до 98 ц/га, тобто втрати внаслідок великої кількості рештків у борозні сягали 13 ц/га.

Отримані результати мають практичну спрямованість. Неякісний обробіток ґрунту після попередника, зміна ґрунтово-кліматичних умов, зниження рівня біоти у ґрунті значно впливають на інтенсивність перегнивання залишків після попередника.

Маючи результати досліджень, фермер планує, як провести основний обробіток ґрунту і яким чином використовувати посівні машини для отримання оптимального врожаю.

2. Встановлено, що відсутність розгортачів післяжнивних решток призвела до втрат урожайності 1,4 ц/га, а відповідні економічні втрати, при закупівельній ціні 7500 грн/т, становили 1050 грн/га, порівняно з застосуванням розгортачів, обладнаних системою Clean Sweep.

Застосування звичайних розгортачів плаваючої конструкції також призвело до втрат урожайності 31,7 ц/га і відповідних збитків у 1275 грн/га.

3. На підставі досліджень розміру качанів у рослин за появою сходів встановлено, що оптимальний термін появи сходів 5 днів. У період від 18 до 28 годин після перших сходів, врожайність знизилась на 6,5%, а в період від 29 до 42 годин – 8%.

4. На основі дослідження економічних показників переобладнання сівалок встановлено, що їх необхідно аналізувати у комплексі.

Слід зауважити, що істотний вплив на ефективність прийняття рішень щодо переобладнання сівалок має площа господарства, врожайність посівних гібридів, можливість надання послуг з використанням сівалки.

Бібліографічні посилання:

1. Vaderstad, (2021). Sozdanie posevnogo lozha [Creating a seedbed]. Voronezh: Vaderstad [in Russian]. URL: <https://www.vaderstad.com/ru/know-how/osnovy-zemledeliya/posevnoe-lozhe/sozdanie-posevnogo-lozha/> (reference date 01.09.2021).
2. Zosymchuk, M. (2021). Alternatyvna orhanika [Alternative organics]. Kiev: Agrotimes [in Ukrainian]. URL: <https://agrotimes.ua/article/zagortannya-pislyazhnyvnyh-reshtok-kukurudzy-pokrashhuye-grunt/> (reference date 01.10.2021).
3. Makhdi al-Kaisa, (2020). Mify ta fakty pro rozkladannia roslynnykh reshtok silhospkultury (amerykanskyi dosvid) [Myths and facts about the decomposition of crop residues (American experience)]. Kiev: Superagronom [in Ukrainian]. URL: <https://agrotimes.ua/article/zagortannya-pislyazhnyvnyh-reshtok-kukurudzy-pokrashhuye-grunt/> (reference date 01.10.2021).

Zubko V. M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PURITY OF THE SOWING FROW ON THE YIELD IN CULTIVATION OF MAIZE ON GRAIN

Among the great variety of crops grown in the fields today, corn occupies a significant place. The spread of this culture is due to the declared demand for it. Therefore, today corn is becoming one of the leading crops grown in different countries and continents.

One of the main processes of growing crops in general technology is to ensure quality sowing.

Today, technologies that use all sorts of sensors to monitor the sowing and sowing of crops are becoming more common. Precision Planting and John Deere are one of the main manufacturers of modern sowing equipment. In their arsenal

there are a number of systems to ensure optimal sowing, the main of which today are:

- seed singulation on vSet sowing machines;
- use of Keeton seed clamps;
- application of mulching film;
- application of the Clean Sweep system;
- high-speed sowing of corn using the Speed Tube system;
- application of Delta Force system;
- application of the vDrive system;
- Furrow Jet openers.

The efficiency of using the Clean Sweep system during sowing is investigated. Crop residue management has become a very important operation today to maximize profitability. Hard stalks and re-sowing of corn on corn create a fairly high density of residues. The amount of residue can affect the humidity and the rate of warming of the soil in the spring. Plant remains may contain diseases that damage young shoots. Therefore, string cleaners must remove them from the cuttings.

If there is enough residue, you can increase the pressure on the cleaners to remove debris. If there are few residues or the soil is too soft, you can relieve the pressure on the cleaners so that they float on top.

The study used a new method of analyzing the effectiveness of sowing “Methods of flags”. As a result of the research, the effect on the yield of plant residues remaining in the furrow during sowing was obtained. The conducted researches have established the efficiency of using the clamping force control system of the Clean Sweep post-harvest residue spreaders.

Based on the analysis of the research, the weight of cobs during harvesting was calculated and the dependence of friendliness and uniformity of maize seedlings on grain on yield was obtained, which shows crop losses due to delayed emergence of seedlings in each category.

Key words: sowing of corn, quality of sowing, plant remains.

Дата надходження до редакції: 24.11.2021 р.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СІВБИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР СОШНИКАМИ ДЛЯ ПРЯМОГО ПОСІВУ НА СХИЛАХ

Павельчук Юрій Федорович

кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0001-5028-8151

yuriy3372@gmail.com

Ляшук Олег Леонтійович

доктор технічних наук, професор

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

ORCID: 0000-0003-4881-8568

oleglashuk@ukr.net

Грушецький Сергій Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-6434-1213

g.sergiy.1969@gmail.com

Прокопова Ольга Петрівна

кандидат педагогічних наук, доцент

Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-2108-0009

olhapropova75@gmail.com

Натепер посів є одним із найактуальніших завдань, саме тому широко затребувана універсальна посівна техніка, яка повинна забезпечити рівномірний розподіл числа рослин на одиницю площі для створення однакових умов розвитку.

Теоретичні дослідження проводили з використанням методів теоретичної механіки, опору матеріалів, теорії ймовірності, математичного аналізу й моделювання. Дослідження проводяться на основі численної реалізації рівнянь динаміки суцільного середовища у прикладних програмах інженерного розрахунку – САЕ-системах.

У статті проведений теоретичний аналіз взаємодії ґрунтового шару із поверхнею робочого органа сівалки під виконання технологічного процесу висіву насіння зернових культур на схилах. Отримали схему сил що діють на ґрунт під час робочого процесу, схему сил які діють на шар ґрунту під час руху вздовж схила, схему для визначення параметрів робочої площини, початкові і граничні умови взаємодії робочого органа з ґрунтовим середовищем. Розглянули процес взаємодії робочого органа, який має форму плоского двогранного клина, з ґрунтовим середовищем під час роботи у горизонтальній площині і отримали схему сил що діють на ґрунтовий шар. З метою визначення товщини шару ґрунту, що потрапляє на робочу поверхню робочого органа зобразили векторну діаграму швидкості шару ґрунту, тобто визначили співвідношення швидкостей руху робочого органа та відносної швидкості шару ґрунту по робочій поверхні сошника. Отримали схему зміни швидкостей шару ґрунту на схилах. Для знаходження сили тяжіння шару ґрунту, що діє на робочий орган, зобразили схему роботи робочого органа на схилі і отримали схему сил які діють на шар ґрунту на схилах. Під час переміщення робочого органа вгору по схилу отримали залежність сили тяжіння шару ґрунту на поверхні робочого органа та сили підпирання від кута нахилу схила.

Розглянуто початкові і граничні умови математичної моделі технологічного процесу, та розроблено методику реалізації математичної моделі технологічного процесу роботи робочого органа на схилах з різними значеннями кута нахилу робочої поверхні.

Розроблено математичну модель технологічного процесу обробітку ґрунту на різних типах агроландшафтів експериментальними робочими органами. Встановлено початкові та граничні умови математичної моделі технологічного процесу обробітку ґрунту з врахуванням нахилу робочої поверхні поля.

Ключові слова: робочий орган, технологічний процес, суцільне середовище, моделювання, сівба, зернові, сошник, фізико-механічні властивості ґрунту.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.3>

Вступ. На сьогоднішній день посів є одним з найактуальніших завдань, саме тому широко затребувана універсальна посівна техніка, яка повинна

забезпечити рівномірний розподіл числа рослин на одиницю площі для створення однакових умов розвитку.

Будь-який сошник повинен: очищувати посівне ложе від органічних залишків; укладати насіння у посівний горизонт; підтримувати постійну глибину посіву; мати хороше самоочищення; прикривати насіння достатньою кількістю вологого ґрунту; швидко пристосовуватись до змінних ґрунтових умов; мати захист від каменів; мати значний термін використання (ресурс) і низькі експлуатаційні витрати на обслуговування (Невко et al., 2013).

Підвищенню довговічності елементів посівних машин присвячені роботи вчених: В.В. Амосова, Л.В. Аніскевича, А.І. Бойка, Б.М. Гевка, В.І. Пастухова, М.М. Петренка, В.М. Сала, П.В. Сисоліна, М.О. Свіреня, Ю.Ф. Павельчука, А.В. Рудя та інших науковців.

Зокрема Б.М. Гевко у своїй праці вирішив такі завдання: підвищення надійності та продуктивності однозернових висівних апаратів (Невко et al., 2013; Невко et al., 2014; Невко, 2012); розробка моделі руху частинки висівного матеріалу (Pavelchuk et al., 2016; Lashyk et al., 2017), що дає можливість визначити кінематичні та силові параметри під час взаємодії насінини з конічними та плоскими висівними дисками.

У працях В.В. Амосова (Amosov, 2007; Kosinov et al., 2012), В.В. Ауліна (Aulin et al., 2017; Aulin et al., 2016; Aulin et al., 2016), А.І. Бойка (Bojko et al., 2005; Bojko et al., 2011; Bojko et al., 2006), П.В. Сисоліна (Sysolin et al., 2008; Sysolin et al., 2007; Sysolin et al., 2015), М.О. Свіреня (Sviren et al., 2015; Lisovyi et al., 2015), вирішені питання обґрунтування параметрів висівних апаратів пневматичної (пневмомеханічної, механічної) дії, підвищення якості та надійності їх роботи.

Роботи В.М. Сала (Pavelchuk, 2009; Luzan et al., 2012), Ю.Ф. Павельчука (Salo et al., 2010; Невко et al., 2016), та А.В. Рудя (Rud et al., 2009; Rud et al., 2010), направлені на вирішення завдання обґрунтування параметрів сошників для сівби культур та підвищення рівномірності розподілу насіння в ґрунті.

На сьогоднішній день для вивчення технологічного процесу взаємодії робочих органів з ґрунтом береться до уваги концепція та системо-аналогова модель функціонування комбінованого ґрунтообробно-посівного агрегата (Hrushetskyi et al., 2021) або певна модель ґрунту, яка описується фізичними явищами що в ньому відбуваються, з достатньою ймовірністю наближеною до реального стану (Naumenko et al., 2017; Derkach et al., 2017).

Матеріали і методи дослідження. Під час моделювання технологічного процесу обробки ґрунту, беруть до уваги суцільне середовище що деформується, та здійснюється реалізація у програмних комплексах з метою одержання розрахункової площини. Як відомо, розрахунковою площиною є об'єм простору, для якого задано рівняння математичної моделі та визначено початкові і граничні умови її функціонування. Зазвичай розрахункова площина для завдань обробки ґрунту представляється у вигляді паралелограма, розміри сторін якого залежать від зони деформації ґрунту робочим органом який розглядаємо.

Теоретичні дослідження проводили з використанням методів теоретичної механіки, опору матеріалів, теорії ймовірності, математичного аналізу й моделювання. Дослідження проводяться на основі численної реалізації рівнянь динаміки суцільного середовища у прикладних програмах інженерного розрахунку – CAE-системах, наприклад, у програмних комплексах *FlowVision*, *Ansys*, *Solidworks* та ін.

Результати досліджень. Система рівнянь динаміки деформованого суцільного багатофазного ґрунтового середовища у вдосконаленому вигляді запишемо так (Naumenko et al., 2017)

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dt} + \frac{dV_i}{dx}V_x + \frac{dV_i}{dy}V_y + \frac{dV_i}{dz}V_z = F_i - \frac{1}{\rho} \left(\frac{dp}{dt} \right) + (1 + 5\alpha_\tau) \mu \nabla^2 V_i (i = x, y, z), \\ \frac{dp}{dt} + \text{div}(\rho V) = M, \end{cases} \quad (1)$$

де $\alpha_\tau = 0,3 \dots 0,7$ – коефіцієнт вмісту твердих частинок у ґрунті;

$$\nabla^2 V_i = \frac{d^2 V_i}{dx^2} + \frac{d^2 V_i}{dy^2} + \frac{d^2 V_i}{dz^2} \text{ – лапласіан.}$$

Подання цієї моделі у роботах (Naumenko et al., 2017; Derkach et al., 2017) здійснено без врахування мікрорельєфу ґрунту, тобто поверхня розглядалась як умовно рівною – горизонтальною. Так, під час використання у реальних умовах, на характер переміщення ґрунту робочим органом здійснює вплив зміни напрямку руху дії сили тяжіння, відносно поверхні робочого органа.

Під час роботи посівних агрегатів на схилах на характер переміщення ґрунту робочим органом здійснює вплив зміна напрямку дії сили тяжіння відносно робочої поверхні сошника. Тому під час моделювання процесу взаємодії робочого органа з шаром ґрунту на схилах необхідно брати до уваги, що сошник нахилється відносно віртикальної осі на кут нахилу рельєфу Ω , що спонукає до зміни технологічних параметрів робочого органа відносно горизонтальної площини.

Під час використання робочого органа у виробничих умовах, що має форму стрілкової лапи, ґрунт буде переміщуватися вздовж сили нормальної реакції робочого органа N під кутом β до вертикалі і буде сходити симетрично на два боки.

Розглянемо рух агрегата по похилій поверхні поля (рис. 1).

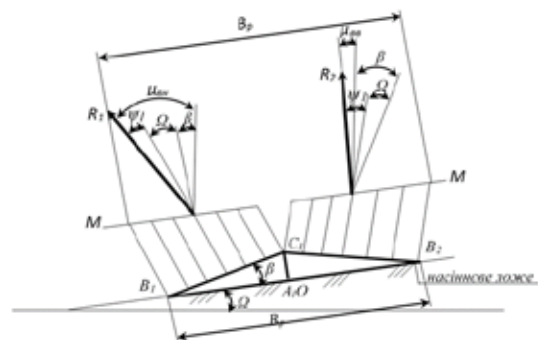


Рис. 1. Схема сил що діють на ґрунт під час робочого процесу

Як ми бачимо, для нижнього крила лапи кут відхилення сили від вертикалі буде рівним

$$\mu_{BH} = \beta + \Omega + \psi_1, \quad (2)$$

Так, для клина який штовхає ґрунт вгору (верхнє крило сошника) одержимо

$$\mu_{BH} = \beta - \Omega - \psi_1, \quad (3)$$

де Ω – кут нахилу мікрорельєфу, град,

ψ_1 – поперечне відхилення за рахунок бокової сили, град.

Кут відхилення ψ_1 під час руху агрегата вздовж горизонталей визначається:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{\sin \Omega \cos \beta}{\cos \varepsilon_1}, \quad (4)$$

де технологічний кут встановлення робочої поверхні до горизонтальної площини ε_1 знаходимо з виразу

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \operatorname{tg} \gamma \frac{\sin \beta}{\sin(\beta \pm \Omega)}. \quad (5)$$

Під час руху агрегата вздовж схилу також виникає відхилення діючої сили в напрямі руху під дією складової сили тяжіння ґрунту (рис. 2).

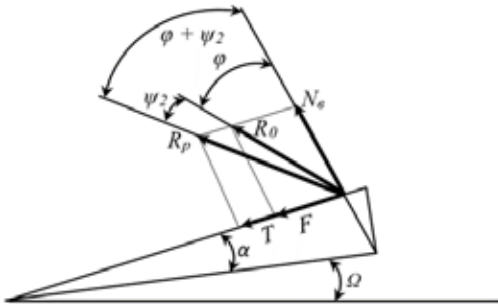


Рис. 2. Схема сил які діють на шар ґрунту під час руху вздовж схила

Як видно з рисунка 2, рівнодіюча сил R_{po} під час руху робочого органав здовж схилу донизу відхиляється від нормалі на кут $\varphi + \psi_2$, де кут ψ_2 визначаємо з виразу

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{\sin \Omega \cos \alpha}{\cos \varepsilon_2},$$

анлогічно визначаємо величини ε_2 та γ_1 :

$$\operatorname{tg} \varepsilon_2 = \operatorname{tg} \varepsilon \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \Omega) \sin \gamma}{\operatorname{tg} \alpha \sin \gamma_2},$$

$$\operatorname{tg} \gamma_2 = \operatorname{tg} \gamma \frac{\sin(\alpha + \Omega)}{\sin \alpha}.$$

Таким чином, під час обробітку схилів розрахункова площа в порівняння з роботою на рівній поверхні буде мати свої параметри (рис. 3).

Мінімальна відстань L_{ep} від робочого органа до стінок робочої площини (паралелепіпеда) у поздовжній площині буду визначатись

$$L_{ep} = a \operatorname{tg}(\alpha + \varphi + \psi_2), \quad (6)$$

де a – глибина ходу робочого органа, м.

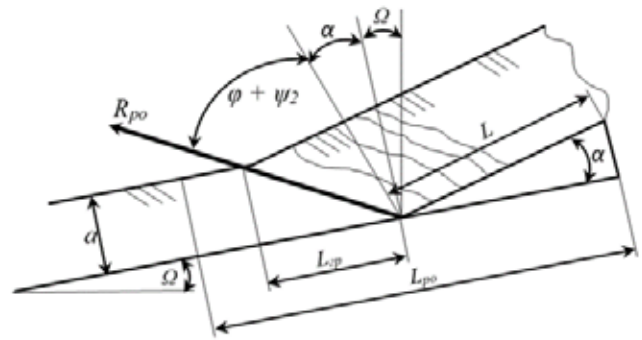


Рис. 3. Схема для визначення параметрів робочої площини

З врахуванням визначеного коефіцієнта запасу, який враховує неоднорідність ґрунтового середовища, а також функцію динамічного фактора тиску ґрунтового шару можна визначити довжину розрахункової площини

$$L_{ep} = S \cos \alpha + k_L L_{ep} \quad (7)$$

де S – геометричний розмір робочого органа, м;

$k_L = 1,5 \dots 2$ – коефіцієнт запасу.

Ширина робочої площини B_{po} має бути відповідною ширині захвату робочого органа B_p , а тому

$$B_{po} = B_p + a \operatorname{tg}(\beta + \psi_1) + a \operatorname{tg}(\beta - \psi_1). \quad (8)$$

Висота розрахункової площини H_{po} має бути більшою за розмір лобової проекції робочого органа у вертикальній площині.

Після визначення границь площини необхідно визначити початкові умови для подальших досліджень. В нашому випадку початковими умовами задамо значення швидкості потоку робочого середовища на поверхню робочого органа V_o і на вході у розрахункову площину робочого органа, та фізико-механічні властивості ґрунту (рис. 4) (Naumenko et al., 2017; Derkach et al., 2017).

Під час визначення граничних умов дна насінневого ложе необхідно враховувати тиск зі сторони нижніх шарів ґрунту. Цей тиск виникає як опір об'ємному зминанню ґрунту робочим органом. Для визначення граничних умов дна насінневого ложе необхідно визначити вертикальну силу S перпендикулярну дну, що виникає під час деформації ґрунту.

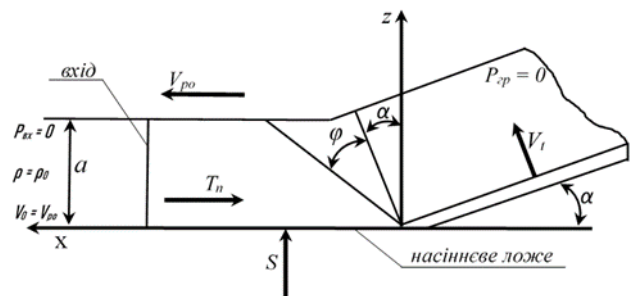


Рис. 4. Початкові і граничні умови взаємодії робочого органа з ґрунтовим середовищем

Сила підпирання W_n буде діяти за двома напрямками: в горизонтальному у напрямку руху робочого органа T_n та вертикальному S , що направлений вгору.

Вертикальна складова визначатиметься

$$S = W_n \sin \alpha = (G \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + G \sin \alpha) \sin \alpha.$$

Після перетворення одержуємо вираз

$$S = \left(I h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin \varphi + \sin \alpha) \right) (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha) \frac{\sin 2\alpha}{2} B_p \rho g. \quad (9)$$

Під час роботи робочого органа на схилах з нахилом Ω та під час руху вздовж схила буде проходити зміна величини сили підпирання S . Розглянемо цю ситуацію під час руху робочого органа донизу вздовж схилу.

Водночас проходить зміна напрямку векторів швидкостей за рахунок зміни напрямку абсолютної швидкості руху шару ґрунту на кут ψ_2 відносно напрямку руху робочого органа (рис. 5).

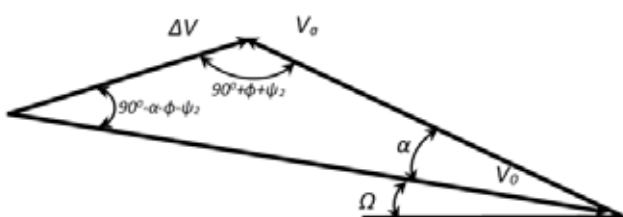


Рис. 5. Схема зміни швидкостей шару ґрунту на схилах

Тоді товщина шару ґрунту перед робочим органом буде визначатись

$$h_1 = a \frac{\cos(\varphi + \psi_2)}{\cos(\alpha + \varphi + \psi_2)}. \quad (10)$$

Для знаходження сили тяжіння шару ґрунту, що діє на робочий орган, зобразимо схему роботи робочого органа на схилі (рис. 6).

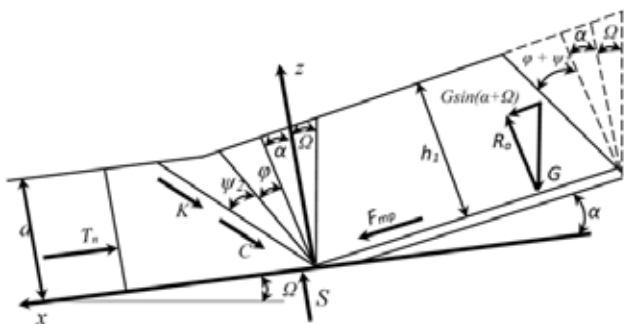


Рис. 6. Схема сил які діють на шар ґрунту на схилах

Зі схеми видно, що

$$G = \left(I h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin(\varphi + \psi_2) + \sin(\Omega + \alpha)) \right) B_p \rho g, \quad (11)$$

а сила підпирання

$$S = (G \cos(\alpha + \Omega) \operatorname{tg} \varphi + G \sin(\alpha + \Omega)) \sin \alpha,$$

одержуємо кінцевий результат

$$S = \left(I h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin(\varphi + \psi_2) + \sin(\Omega + \alpha)) \right) \times \left[\cos(\alpha + \Omega) \operatorname{tg} \varphi + \sin(\alpha + \Omega) \right] \sin \alpha B_p \rho g, \quad (12)$$

На величину підпирання впливають кути γ та ε робочого органа (рис. 7, 8).

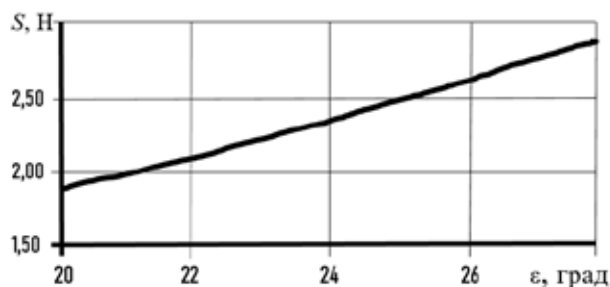


Рис. 7. Залежність сили підпирання S від кута ε , коли $\gamma = 30^\circ$

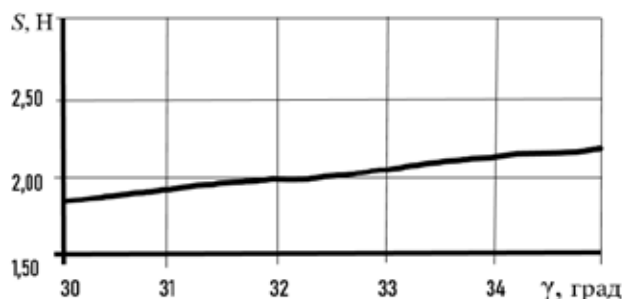


Рис. 8. Залежність сили підпирання S від кута γ , коли $\varepsilon = 30^\circ$

Обговорення. Аналізуючи отримані дані, слід зауважити, що під час зміни кута нахилу схила в напрямі руху робочого органа суттєво змінюються показники сили тяжіння шару ґрунту на поверхні робочого органа. Не беручи до уваги сказане вище, зауважимо, що величина підпирання дна борозни практично залишається стабільною, а це своєю чергою дає обґрунтування – умови утворення насіннєвого ложа не залежать від рельєфу місцевості та мікрорельєфу.

Значення величини підпирання збільшуються із збільшенням значень вище згаданих кутів робочого органа, що дає змогу отримати збільшення щільності насіннєвого ложа. Таким чином, ми узгодили та уточнили початкові і граничні умови математичної моделі технологічного процесу обробітку ґрунту під час використання робочого органа на схилах.

Висновки. Розроблено математичну модель технологічного процесу обробітку ґрунту на різних типах агроландшафтів експериментальними робочими органами. Встановлено початкові та граничні умови математичної моделі технологічного процесу обробітку ґрунту з врахуванням нахилу робочої поверхні поля. Розроблено методику реалізації математичної моделі процесу обробітку ґрунту на схилах, яка дає змогу використовувати таку математичну модель під час виконання технологічних робіт на схилах з різним рельєфом.

Бібліографічні посилання:

1. Hevko, B.M., Pavelchuk, Y.F., Lototskyi, R.I., Navrotska, T.D. (2013). Tekhnolohichnist konstruktсии odnozernovykh vysivnykh aparativ sivalok [Manufacturability of single-grain sowing machines of seeders]. *Silskohospodarski mashyny*. Vyp. (24), 61–67. (in Ukrainian).
2. Hevko, B.M., Liashuk, O.L., Pavelchuk, Y.F., Pryshliak, V.M. ta in. (2014). Tekhnolohichni osnovy proektuvannia ta vyhotovlennia posivnykh mashyn : monohrafiia [Technological bases of design and manufacture of sowing machines]. *Ternopil: Vyd. TNTU imeni Ivana Puliuia*, 238. (in Ukrainian).
3. Hevko, B.M. (2012). Matematychna model rukhu zerna po rukhomym poverkhniam vysivnykh aparativ [Mathematical model of grain movement on moving surfaces of sowing machines]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. 11, 113–118. (in Ukrainian).
4. Pavel'chuk, Y.F., B.M. Gevko. (2016). Matematychna model' dinamiki sistemy «semjaprovod-zerno» [Mathematical model of the dynamics of the “seed tube-grain” system]. *Teorija i praktika srovennoy nauki*. 12, 330–334. (in Russian).
5. Lashyk, O, Gevko, B., Pavelchuk, Y. (2017). Grounding of subsoil-throwing sowing of grain-crops. *Scientific journal «Fundamentalis scientiam»*, (Madrid, Spain), 2(3), 106–111. (in English).
6. Amosov, V.V. (2007). Obgruntuvannia parametriv universalnoho vysivnoho aparata dlia prosapnykh kultur [Substantiation of parameters of the universal sowing device for row crops]. KNTU. Kirovohrad, 131. (in Ukrainian).
7. Kosinov, M.M., Amosov, V.V., Martynenko, S.A., Kyrychenko, A.M., Vinnik, O.L. (2012) Udoskonalennia konstruktсии pnevmatychnoho vysivnoho aparata z metoiu pokrashchennia yakosti sivby [Improving the design of the pneumatic sowing machine in order to improve the quality of sowing]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, Vyp. 42(1), 194–198. (in Ukrainian).
8. Aulin, V.V., Pankov, A.A., Shheglov, A.V. (2017). Issledovanie vybrosa semjan propashnykh kul'tur pnevmostrujnym vysevajushhim apparatom [Investigation of seed ejection of tilled crops by pneumatic jet sowing machine]. *Visnik inzhenernoi Akademii Ukraïni*, m. Kyiv. 1, 221–225. (in Russian).
9. Aulyn, V.V., Pankov, A.A., Shcheglov, A.V. (2016). Konstruktyvno- komonovochnye skhemy vysevaiushchykh system s elementamy pnevmonyky [Structural and layout diagrams of sowing systems with pneumatic elements]. *Visnyk inzhenernoi Akademii Ukrainy*, m. Kyiv. 1, 142–147. (in Ukrainian).
10. Aulin, V.V., Pankov, A.A., Zamota, T.N. (2016). Nadozhnost' rabochih processov tehnycheskikh sredstv APK s jelementamy pnevmoniki [Reliability of working processes of technical means of agro-industrial complex with elements of pneumonics]. *Naukovij zhurnal «Tehnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv»*. 5, 117–125. (in Russian).
11. Bojko, A.I. Sviren', N.A. (2005). Analiz parametrov dozirujushhego ustrojstva na jeffektivnost' otbora semja [Analysis of the parameters of the dosing device for the efficiency of seed selection]. *Konstruiuvannia, virobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skogospodars'kih mashyn: Zagal'noderzhavnij mizhvidomchij nauko-technichnij zbirnik*. Vyp(35), 259–267. (in Russian).
12. Bojko, A.I. Sviren', N.A. (2011). Povyshenie jeffektivnosti i nadezhnosti raboty vysevajushhiih aparatov posevnykh mashyn [Increasing the efficiency and reliability of the sowing machines of sowing machines]. Kirovograd, KOD, 276. (in Russian).
13. Boiko, A.I., Amosov, V.V. (2006). Eksperymentalne vyznachennia ratsionalnykh parametrov vakuumnoho pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparata [Experimental determination of rational parameters of vacuum pneumomechanical seeding machine]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s.-h. mashyn*. Kirovohrad: KNTU, Vyp(36), 108–110. (in Ukrainian).
14. Sysolin, P.V. (2008). Zvychnai pidkhody po stvorenniu universalnykh vitchyznianskykh sivalok dlia sivby zernovykh kultur [Conventional approaches to the creation of universal domestic seeders for sowing cereals]. Kirovohrad, 84. (in Ukrainian).
15. Sysolin, P.V., Sviren, M.O., Lisovyi, I.O. (2007). Priama sivba. Zadachi i napriamky rozvytku soshnykiv dlia priamoj sivby [Direct sowing. Tasks and directions of development of openers for direct sowing]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*. KNTU, Vyp(37), 94–98. (in Ukrainian).
16. Sviren, M.O., Anisimov, O.V. Solovykh, Ye.K. (2015). Doslidzhennia parametrov ta rezhymiv roboty pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparatu nadlyshkovoho tysku z retsyrkuliuuchym potokom nasinnia [Investigation of parameters and modes of operation of pneumomechanical seeding apparatus of excess pressure with recirculating seed flow]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia*, Kirovohrad: KNTU, Vyp(28), 223–229. (in Ukrainian).
17. Lisovyi, I.O., Boiko, A.I., Sviren, M.O., Pushka, O.S. (2015). Priama sivba ta obgruntuvannia parametrov soshnyka [Direct sowing and substantiation of opener parameters]. *Visnyk Ukrainського viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity*. Vyp(3), Melitopol: Kopitsentr «Dokument-servis», 176–189. (in Ukrainian).
18. Salo, V.M., Luzan, O.R. (2010). Vybir napriamiv vdoskonalennia soshnykiv sivalok priamoho posivu zernovykh kultur [Choice of directions of improvement of openers of seeders of direct sowing of grain crops]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*. Kirovohrad: KNTU. Vyp(40), Chast. II, 271–277. (in Ukrainian).
19. Luzan, O.R., Salo, V.M., Luzan, P.H., Leshchenko S.M. (2012). Obgruntuvannia parametrov posivnoi seksii dlia priamoj sivby zernovykh kultur [Substantiation of parameters of sowing section for direct sowing of grain crops]. *Tekhnichni nauky*. Vinnytsia: VNAU. Vyp(11). T. 2 (66), 217–222. (in Ukrainian).
20. Pavelchuk, Y.F. (2009). Obgruntuvannia parametrov soshnykiv dlia sivby zernovykh kultur pidhruntovo-rozkydnym sposobom [Substantiation of opener parameters for sowing grain crops by subsoil-spreading method]. Kamianets-Podilskyi, 245. (in Ukrainian).

21. Hevko, B.M., Pavelchuk, Y.F. (2016). Doslidzhennia protsesu rozpodilu nasinnia zernovykh kultur pry pidhruntovorozkydnomu sposobi sivby [Study of the process of distribution of seeds of cereals in the subsoil method of sowing]. Ch. 2. *Tekhnichni nauky*. Kamianets-Podilskyi, Vyp(24), 25–32. (in Ukrainian).
22. Rud, A.V., Pavelchuk, Y.F., Moshenko, I.O. (2009). Teoretychni doslidzhennia protsesu rozpodilu nasinnia zernovykh kultur pry pidhruntovo-rozkydnomu sposobi sivby [Theoretical studies of the process of distribution of seeds of cereals in the subsoil-spreading method of sowing]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, Kirovohrad: KNTU, Vyp(39), 250–256. (in Ukrainian).
23. Rud, A.V., Pavelchuk, Y.F., Moshenko, I.O. (2010). Vplyv sposobu podachi nasinnia v kameru rozsvitu na rivnomirnist yoho rozpodilu po ploshchi zhyvlennia [The influence of the method of feeding seeds into the screening chamber on the uniformity of its distribution over the feeding area]. *Tekhnika ta enerhetyka APK*, K, Vyp(144), Ch. 2, 288–295. (in Ukrainian).
24. Shustik, L., Haidai, T. (2012). Poshuk alternatyvnykh enerhooschadnykh tekhnolohii i doslidzhennia dlia posivu dribnonasinnievkykh kultur [Search for alternative energy-saving technologies and research for sowing small-seeded crops]. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*. Vyp16(30). Knyha 2, 116–119. (in Ukrainian).
25. Danyliuk, T. (2011). Obgruntuvannia tekhnolohii obrobitku gruntu ta posivu [Substantiation of tillage and sowing technology]. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*. Vyp15(29), 486–488. (in Ukrainian).
26. (2012). Mini-sivalka BioDrill na kultyvatorakh Vaderstad naibilsh ekonomichni sposib posivu syderalnykh kultur i ozymoho ripaku [Mini-drill BioDrill on Vaderstad cultivators the most economical way of sowing green manure and winter rape]. *Zemledelets*. 4, 18–23. (in Ukrainian).
27. Pryshliak, V.M., Yaropud, V.M., Poborozniuk, O.A. (2017). Osoblyvosti polytsevoho ta bezpolytsevoho obrobitku gruntu [Features of shelf and non-shelf tillage]. *Suchasni problemy vyrobnytstva, pererobky silskohospodarskoi produktsii, mashynobuduvannia ta enerhetychnykh system APK*, Vinnytsia, Vyd-vo VNAU, 133–135. (in Ukrainian).
28. Rolduhin, M.I., Ponomarenko, N.O., Yaropud, V.M., Sydorenko, R.M. (2017). Stan i perspektyvy rozvytku kombinovanykh ahrehativ [Status and prospects of development of combined units]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. Vinnytsia, 2(98), 40–43. (in Ukrainian).
29. Derkach, O.D., Naumenko, M.M., Makarenko, D.O. (2015). Do pytannia stvorennia shyrokozakhvatnykh posivnykh kompleksiv z pidvyshchenym resursom rukhomykh ziednan [On the issue of creating wide-reaching sowing complexes with increased resource of mobile joints]. Kh: Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka. 159, 186–193. (in Ukrainian).
30. Naumenko, M.M., Derkach, O.D. (2017). Pobudova matematychnoi modeli protsesu vzaiemodii dyskovy-ankernoho soshnyka z hruntom pry dynamichnykh navantazhenniakh [Construction of a mathematical model of the process of interaction of the disk-anchor opener with the soil under dynamic loads]. *Tekhnichniy servis mashyn dlia roslynnystva*. Vyp(181), 267–274. (in Ukrainian).
31. Derkach, O.D., Makarenko, D.O. (2017). Teoretychni peredumovy do obgruntuvannia rezhymiv roboty paralelohrannoho kopiivalnogo mekhanizmu [Theoretical prerequisites for substantiation of the modes of operation of the parallelogram copying mechanism]. *Molodezh y selskokhoziaistvennaia tekhnika v XXI veke : XIII Mezhdun. forum molodezhy*. Kh: KhNTUSH, 61. (in Ukrainian).
32. Derkach, O.D., Naumenko, M.M. (2017). Teoretychne obgruntuvannia rezhymiv roboty paralelohrannoho kopiivalnogo mekhanizmu [Theoretical substantiation of the modes of operation of the parallelogram copying mechanism]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn ta obladnannia*. Kropyvnytskyi : TsNTU, 13–16. (in Ukrainian).
33. Derkach, O.D., Makarenko, D.O. (2017). Rozrobka systemy pidvyshchenoi korektnosti kopiiuvannia poverkhni hruntu [Development of a system of increased correctness of copying the soil surface]. *Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky*. Kamianets-Podilskyi: PDATU, 79–82. (in Ukrainian).
34. Rud, A.V., Bendera, I.M., Voitiuk, D.H. (2012). Mekhanizatsiia, elektryfikatsiia ta avtomatyzatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva [Development of a system of increased correctness of copying the soil surface]. K : Ahrosvita, 584. (in Ukrainian).
35. Hrushetskyi, S.M., Slotvinska, N.Ia. (2021). Kontseptsii ta systemo-analohova model funktsionuvannia kombinovanoho hruntoobrobno-posivnogo ahrehata [Concept and system-analog model of operation of the combined tillage and seeding unit]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstruksii ta tekhnichnoho servisu silskohospodarskykh mashyn i znariad*. Zhytomyr: ATK, 39–41. (in Ukrainian).

Pavelchuk Yu. F., PhD in Technical Science, Higher Education Institution Podilsk State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Lyashuk O. L., Doctor of Technical Science, Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy, Ternopil, Ukraine

Hrushetskyi S. N., PhD in Technical Science, Higher Education Institution Podilsk State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Prokopova O. P., PhD in Pedagogical Sciences, Higher Education Institution Podilsk State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF SOWING GRAIN CROPS BY OPENERS FOR DIRECT SOWING ON SLOPE

Today, sowing is one of the most urgent tasks, which is why universal sowing technology is in great demand, which should ensure an even distribution of the number of plants per unit area to create a level playing field.

Theoretical research was conducted using the methods of theoretical mechanics, resistance of materials, probability theory, mathematical analysis and modeling. The research is carried out on the basis of numerous realizations of the

equations of dynamics of the continuous environment in applied programs of engineering calculation – CAE-systems.

The article presents a theoretical analysis of the interaction of the soil layer with the surface of the working body of the seeder to perform the technological process of sowing seeds of cereals on the slopes. Received a scheme of forces acting on the soil during the working process, a scheme of forces acting on the soil layer during movement along the slope, a scheme for determining the parameters of the working plane, initial and boundary conditions of interaction of the working body with the soil environment. We considered the process of interaction of the working body, which has the shape of a flat dihedral wedge, with the soil environment during work in the horizontal plane and obtained a scheme of forces acting on the soil layer. In order to determine the thickness of the soil layer falling on the working surface of the working body, a vector diagram of the soil layer velocity was plotted, ie the ratio of working body velocity and relative soil layer velocity on the opener working surface was determined. A scheme of changing the velocities of the soil layer on the slopes was obtained. To find the gravitational force of the soil layer acting on the working body, they drew a diagram of the working body on the slope and obtained a diagram of the forces acting on the soil layer on the slopes. During the movement of the working body up the slope, the dependence of the force of gravity of the soil layer on the surface of the working body and the support force on the angle of inclination of the slope.

The initial and boundary conditions of the mathematical model of the technological process are considered, and the method of realization of the mathematical model of the technological process of the working body on the slopes with different values of the angle of the working surface is developed.

A mathematical model of the technological process of tillage on different types of agricultural landscapes by experimental working bodies has been developed. The initial and boundary conditions of the mathematical model of the technological process of tillage, taking into account the slope of the working surface of the field.

Key words: working body, technological process, continuum, modeling, sowing, grain, coulter, physical and mechanical properties of the soil.

Дата надходження до редакції: 07.12.2021 р.

ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ГНУЧКОЇ ТРАНСМІСІЇ ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ

Петров Леонід Миколайовичкандидат технічних наук, доцент
Військова академія, м. Одеса, Україна
ORCID: 0000-0001-5709-9986
leonid.petrov2@gmail.com**Кішянус Ігор Володимирович**старший викладач
Військова академія, м. Одеса, Україна
ORCID: 0000-0001-7838-5607
leonid.petrov2@gmail.com**Масліч Наталія Ярославна**кандидат технічних наук, професор
Військова академія, м. Одеса, Україна
ORCID: 0000-0001-5792-910X
leonid.petrov2@gmail.com**Скориченко Олександр Іванович**викладач
Військова академія, м. Одеса, Україна

Робочий процес кочення колісного рушія супроводжується навантаженням колісного рушія гравітаційною силою, що приводить до стискання та розтягування шини при її деформації. У статті розглянуті питання дослідження механічної системи «автомобільне колесо-пружинний реактивний поштовх» із застосуванням теореми про зміну кінетичної енергії цієї системи, загального рівняння динаміки, а також рівняння Лагранжа другого роду.

Метою дослідження є удосконалення технологічної схеми навантаження колісного рушія, перетворення енергії підведеної до колісного рушія в обертальний рух пружинного реактивного поштовху з підвищенням тягового зусилля автомобіля, який є допоміжним фактором до інноваційної технології його переміщення.

Науковий та практичний напрям роботи полягає в тому, що вперше запропонована технологія, у якій при обертанні колісного рушія застосовано енергію обертального руху механічної системи «автомобільне колесо-пружинний реактивний поштовх», яка дозволяє підвищити реалізацію крутного моменту на колісному рушії.

Методологією дослідження являлося встановити математичний зв'язок між силою, яку створює «автомобільний колісно-пружинний реактивний поштовх», з динамічною рухливістю безпосередньо автомобіля.

Результатом дослідження є розроблена конструкція автомобіля з динамічно-рухливою платформою у циклі демпфування «автомобільним колісно-пружинним реактивним поштовхом» яка працює при «фізичному дисконфорті опорної поверхні». При розкритті поняття «фізичний дисконфорт опорної поверхні» були використані диференціальні рівняння, які математично підтверджують виникнення такої поверхні в певних умовах експлуатації автомобіля. Розрахунки проводились в середовищі EXEL з дотриманням зв'язку між вхідними та вихідними параметрами. Результати досліджень були впроваджені в графічних залежностях $\eta = f(F_\psi)$, $d_m = f(i)$, $P_t = f(i)$, $F_a = f(F_\psi)$, $i = f(F_\psi)$.

Цінність проведеного дослідження, результати проведеної роботи дозволять зробити внесок в галузь автомобільного виробництва.

Запропоновано модель автомобіля придатна для використання з метою підвищення тягових можливостей транспортного засобу.

Ключові слова: фізико-математична модель, рушій, колесо, колісно-пружинний компенсатор.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.4>

1. Вступ

Тягово-зчіпні властивості мають важливе значення в експлуатації мобільних засобів, так як від них в більшості залежить його середня швидкість руху та працездатність. За підвищених значень тягово-зчіпних властивостей збільшується середня швидкість, зменшуються витрати часу на виконання робочого процесу, а також підвищується працездатність мобільного засобу.

Забезпечення реалізації тягово-зчіпних властивостей здійснює трансмісія мобільного засобу. Конструкція трансмісії мобільного засобу в значній степені визначається кількістю його ведучих мостів. Найбільшого розповсюдження отримали мобільні засоби з механічними трансмісіями, які мають два чи три мости.

Еволюція створення та розвитку механічних наземних транспортних засобів розпочалася декілька тисячо-

літь тому зі створення першого типу рушія – колісного. Рушій – це механізм, який перетворює енергію двигуна або іншого зовнішнього джерела через взаємодію з оточуючим середовищем в корисну роботу по переміщенню транспортного засобу, а в нашому випадку – зразка озброєння та військової техніки (ОВТ). На цей час існує шість найбільш розповсюджених типів рушіїв наземної техніки п'ять з яких, знайшли в тій чи іншій мірі застосування в зразках ОВТ застосування в комплексах ОВТ наземного базування провідних країн світу для врахування при розробці і закупівлі перспективних зразків ОВТ ЗС України.

Переміщення автомобіля здійснюється за допомогою колісних рушіїв, які в неповній мірі задовольняють виконання технологічних завдань в зоні наближених до бойових. Основним недоліком являється виконання вимог переміщення військового автомобіля в умовах бездоріжжя, а в деяких випадках неможливість його переміщення. Для підвищення надійності технології переміщення автомобіля в умовах бездоріжжя розробки фахівців світового рівня спрямовані на удосконалення конструкції колісного рушія.

З метою підвищення надійності переміщення військового автомобіля вітчизняного виробництва КраЗ–5233 нами було запропоновано макетний зразок цього автомобіля з модернізованими колісними рушіями.

Великі автомобілебудівні фірми випускають велику кількість вантажних шасі без кузовів. Така система дозволяє гнучко реагувати на заклади споживачів.

У США у випуску спеціалізованого вантажного транспорту розповсюджені рамні конструкції з подовженням. У Європі переважає того чи іншого типу рами по державам, дуже різноманітна. Але у цілому зарубіжні фірми представляють споживачам широку гаму спеціалізованих автомобілів, автопоїздів, які відповідають різноманітним вимогам.

Для більш ефективного використання спеціалізованого рухомого складу (СРС) необхідне постійне проведення робіт із удосконалення його техніко-експлуатаційних показників.

Основні тенденції розвитку СРС полягають у тому, що необхідно виконати наступні умови:

- Ріст корисної вантажопідйомності;
- Ріст швидкості руху;
- Збільшення коефіцієнта використання довжини

$$K_{\text{вд}} = \frac{\text{довжина рами}}{\text{довжина автомобіля}} = \frac{L_p}{L_a};$$

- Збільшення габаритної висоти рухомого складу;
- Зниження коефіцієнту спорядженої маси

$$K_m = \frac{\text{маса спорядженого автомобіля}}{\text{мама перевозимого вантажу}} = \frac{M_{\text{са}}}{M_b};$$

Підвищення питомої потужності

$$N_{\text{пм}} = \frac{\text{потужність двигуна}}{\text{повна вага}} = \frac{N_{\text{дв}}}{N_n}.$$

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним із напрямків розвитку конструктивно закінчених автотранспортних засобів є такі що складаються з декількох ланцюгів з'єднаних між собою різноманітними пристроями. Такі ланцюги – це частини СРС, які мають особисту траєкторію руху та можуть бути активними чи пасивними.

Як напрямок розвитку СРС може бути запропоновано СРС з активним, пасивним та комбінованим приводом, які відповідно представлено на рис. 1.

2.1 Аналіз останніх досліджень та публікацій

Трансмісія складається зі зчеплення, коробки передач, карданного вала, головної передачі та валів приводу задніх коліс. Для передачі на ведучі колеса виробляє мого двигуном крутного моменту усі компоненти трансмісії повинні працювати максимально узгоджено. Для цього вони з'єднуються один з одним системою шарнірів, валів та шестерень. У мобільного засобу (Petrov, 2014, 1–3; Petrov, 2015, с 1–3), а також аналогічно марки Mercedes двигун розвиває достатню потужність в вузькому діапазоні частоти обертання колінчастого вала. Для того, щоб Mercedes розвивав необхідне тягове зусилля передбачається коробка передач з різно – магнітними передаточними числами.

Нові трактори John Deere серії 9410R та 9460R оснащені 24 – швидкісною механічною трансмісією PowerSync або 18 – швидкісною JOHN DEERE Powershift із системою Efficiency Manager, яка є стандартною для всіх гусеничних тракторів і більш потужних колісних моделей. Завдяки простому натисканню кнопки відбувається плавне, без розриву потоку потужності переключання передач.

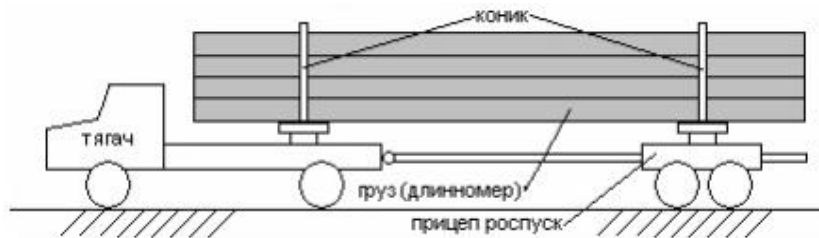
Система Efficiency Manager дає можливість оператору чітко контролювати швидкість руху (на всіх моделях до 40 км/год.), легко та просто встановлюючи її для польових і транспортних робіт. Для цього досить просто переключити швидкість за допомогою спеціального коліщатка на важелі переключання передач.

У найбільш широко використовуваному робочому діапазоні від 4,8 до 12,9 км/год. міститься 10 передач, а інтервал зміни швидкості становить 0,8 км/год. Рівномірний розподіл передаточних чисел дає змогу двигуну працювати в оптимальному діапазоні частоти обертів колінчастого вала, а це, у свою чергу, гарантує найбільш економну витрату палива.

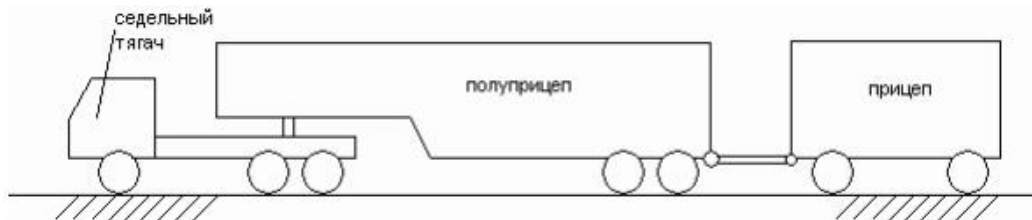
Завдяки PowerSync і PowrShift можна досягти підвищення паливної економності та оптимізації продуктивності. Трансмісія змінює навантаження на двигун, автоматично здійснює вибір передачі для рушання трактора з місця та рух на відповідній швидкості під час виконання польових або транспортних операцій.

Максимальна транспортна швидкість для колісних моделей становить 40 км/год., а для гусеничних – 35 км/год.

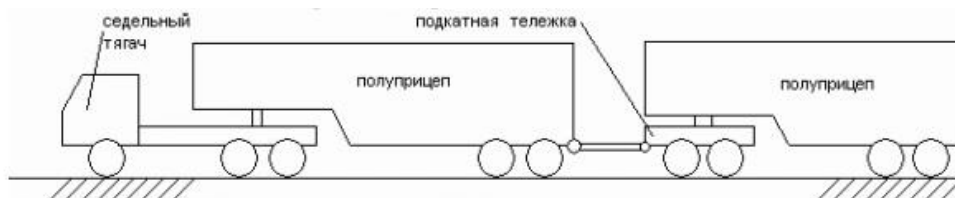
На моделях тракторів 9510R та 9560R у планетарному механізмі встановлено абсолютно новий двосторонній редуктор, що дає змогу працювати швидше.



а.



б.



в.

Рис. 1. Схеми вантажних автомобілів: а – СРС з активним приводом; б – СРС з пасивним приводом; в – СРС з комбінованим приводом

Це знижує навантаження на всю трансмісію в цілому, особливо на внутрішні складові та на зубчастий вінець і шестерню, а також збільшує надійність і довговічність трансмісії.

Трактори Deutz – Fahr мають нову трансмісію Sense-Shift, яка встановлена на тракторах 6-ї серії, – величезний крок вперед з точки зору комфорту управління та продуктивності. Система перемикачів під навантаженням була перероблена, починаючи з коробки передач і закінчуючи важелем перемикачів передач, для швидкої та зручної зміни швидкостей. Але справжнім проривом можна вважати те, що з трансмісією Sense-Shift перемикачів передач пристосовується до особливостей конкретної роботи. Для водія це абсолютно нове сприйняття, оскільки він відчуває лише легке коливання при переході на наступний ступінь. Крім того, додається нова функція Sense Clutch (чутливе зчеплення), яка дає змогу водієві згладжувати потік потужності.

Щоб гарантувати стабільність роботи трактора при оранці або на транспортних роботах, оптимізовано управління трансмісією: електроніка керує підключенням повного приводу і блокуванням диференціалу залежно від швидкості руху та кута повороту коліс.

Трансмісія має 6 діапазонів, кожен із 4 передачами, що перемикаються під навантаженням. Таким чином, передбачено по 24 швидкості в кожному напрямку руху з можливістю встановлення ходозменшувача, доступ-

ного для чотирьох найнижчих діапазонів, що загалом становить 40 + 40 швидкостей.

Широке перекриття передач дає змогу зберігати один діапазон в різних умовах роботи, в той час як зміна передач всередині одного діапазону автоматично регулюється стандартною функцією, яка є в кожній моделі.

Трактори Р-версії обладнані автоматичною трансмісією, коли система електронного контролю вибирає відповідні передачі в кожному діапазоні, оптимізуючи продуктивність двигуна і скорочуючи витрату палива.

Трактори Lamborghini серій R8, R7, R6 та R5 мають автоматичну трансмісію «PowerShift» з автоматичним перемикачів. Автоматичною коробкою передач керує електронний блок, який вибирає без оптимальну передачу у відповідності до поточних значень навантаження і частоти обертання колінчастого валу в конкретний момент часу. Перемикачів передач в серії R8 здійснюється автоматичного під навантаженням без розриву потоку потужності, що дозволяє оператору бути повністю зосередженим на роботі (Vikovich, Cherevko, Zinko, 2018, 166; Zinko, Kraiyunik, Gorbaiy, 2019, 256; Kubich, 2020, 195).

3. Мета та завдання дослідження

Мета: Удосконалення технології передачі крутного моменту від двигуна до колісних рушіїв шляхом створення нової конструкції трансмісії мобільного енергетичного засобу.

Завдання: Розробити конструкторсько-технологічну конструкцію тягового засобу з всюдихідними колісними рушіями.

Викладення нового матеріалу

Спосіб «Гвинторух» переміщення мобільного засобу (рис. 2) здійснюють таким чином: від двигуна 1 крутний момент за допомогою зчеплення 2 передається гвинтовому валу 3. Гвинтовий вал 3 за допомогою втулок 4 та 5, підшипників 6 та 7, кільця 8 та 9 і вертикальних стійок 10, 11 встановлених на осі 12, 13 коліс 14, 15. На колесах 14, 15 закріплений зубчастий вінець 16, 17. На вертикальних стійках 10 і 11 за допомогою осей 18 і 19 рухомо закріплені фігурні важелі 20 і 21.

До кільця 8 та 9 приєднані пружини стиснення 22 і 23. На втулці 4 виконано вмикач 24, а на втулці 5 виконані зубці 25 і 26. У кільці 9 виконано отвори 27 та 28 в яких встановлені осі 29 і 30. На осях 29, 30 рухомо закріплено стопорні важелі 31 і 32. На осі гвинтового вала 3 закріплено вмикач 33.

Спосіб «Гвинторух» переміщення мобільного засобу здійснюється таким чином. Від двигуна 1 за допомогою зчеплення 2 крутний момент передається гвинтовому валу 3. Гвинтовий вал 3 обертаючись разом з втулкою 4 та відносно втулки 5, внутрішня поверхня якої виконана у вигляді різьбової поверхні і дотичної поверхні гвинтового вала 3 створює осьову силу в напрямку руху мобільного засобу. Втулка 4 та 5 за допомогою підшипників 6 та 7 закріплені у кільцях 8 і 9. До кільця 8 та 9 приєднанні пружини 22 та 23 які при дії осьової сили стискаються. Від кільця 9 осьова сила F за допомогою стойки 11 передається осі 13. Таким чином колеса 14 і 15 обертаючись на осях 12 і 13 переміщують мобільний засіб. Фігурні важелі 20 і 21 віддаляються зубчастими вінцями 16 і 17 повертаючись на осях 18 і 19, та не дозволяють мобільному засобу переміщуватись у зворотному напрямку. Відстань між осями 12 і 13 скорочується до моменту коли вмикач 24 поверне стопорний важіль 31 та роз'єднає втулку 5 від кільця 9 які до цього моменту поєднували одне ціле. З цього моменту стиснуті пружини 22 і 23 за допомогою втулки 4 вертикальної стійки 10 обертаючи колесо 14 відносно осі 12. Таким чином відстань між осями 12 та 13 збільшується до моменту коли вмикач 33 не поверне стопорний важіль 32 на осях 29 і 30. З цього моменту втулка 5 та кільце 9 складають одне ціле. Процес укручування гвинтового вала 3 у різьбову втулку 5 повторюється.

Як один із варіантів способу переміщення мобільного засобу запропонована конструкція МЕЗ з удосконаленою трансмісією.

Гвинтова передача енергії від двигуна до колісних рушіїв (рис. 3) складається з таких основних частин: двигуна 2 від якого крутний момент за допомогою зчеплення передається гвинтовому валу 15. На гвинтовому валу закріплені втулки 6 та 11, підшипники 5 та 12, кільця 4 і 9 та вертикальна стійка 25, встановлена на осі 20 колеса 23. На колесі 23 закріплені зубчасті вінці 21, 22. На вертикальній стійці 25 за допомогою осей рухомо закріплені фігурні важелі 24.

До кільця 4 та 9 приєднанні пружини стиснення 3. На втулці 6 виконано вмикач, а на втулці 11 виконані зубці 7 і 14. В кільці 9 виконано отвори в яких встановлені осі 10. На осях 10 рухомо закріплено стопорні важелі 8 та 13. На осі гвинтового вала 15 закріплено вмикач 16.

Гвинтова передача енергії від двигуна до колісних рушіїв здійснюється таким чином. Від двигуна 2 за допомогою зчеплення крутний момент передається гвинтовому валу 15. Гвинтовий вал 15 обертаючись разом з втулкою 6 та відносно втулки 11, внутрішня поверхня якої виконана у вигляді різьбової поверхні і дотичної поверхні гвинтового вала 15 створює осьову силу в напрямку руху мобільного засобу. Втулка 6 та 11 за допомогою підшипників 12 та 5 закріплені у кільцях 4 і 9. До кільця 4 та 9 приєднанні пружини 3 які при дії осьової сили стискаються. Від кільця 11 осьова сила F за допомогою стойки 25 передається осі 20. Таким чином колеса 27 і 23 обертаючись на осях 26 і 20 переміщують мобільний засіб. Фігурні важелі 24 виконанні як одне ціле віддаляються зубчастими вінцями 21 або 22 в залежності від

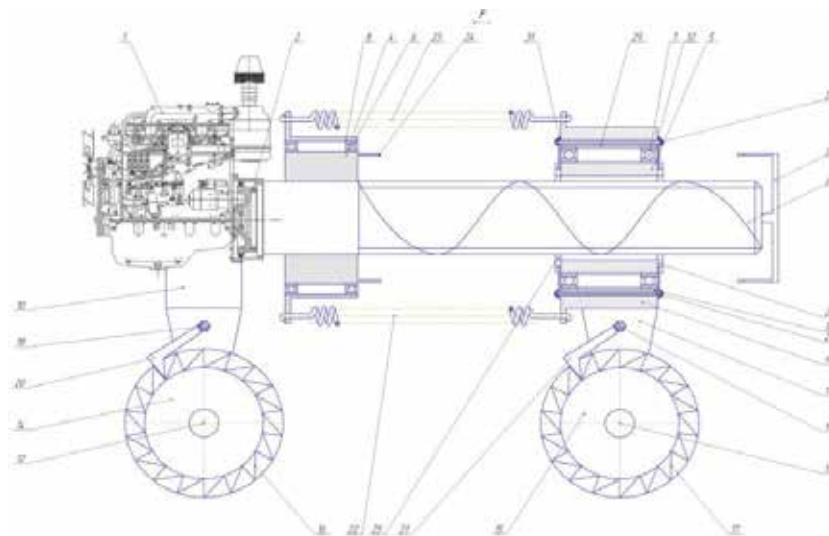


Рис. 2. Спосіб «Гвинторух» переміщення мобільного засобу.

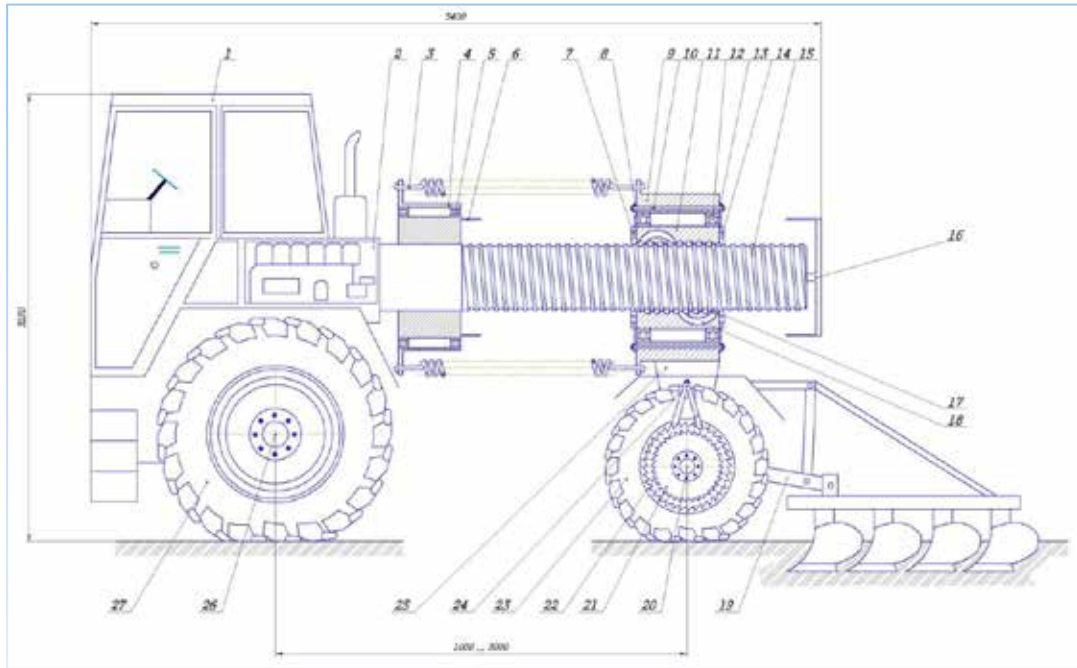


Рис. 3. Гвинтова передача енергії від двигуна до колісних рушіїв МЕЗ

1 – кабіна; 2 – двигун; 3 – пружина стиснення; 4, 9 – кільця; 5, 12 – підшипники; 6, 11 – втулки; 7, 14 – зубці; 8, 13 – стопорні важелі; 10 – осі; 15 – гвинтовий вал; 16 – вмикач; 17 – шарики кочення; 18 – канали; 19 – зчіпка; 20, 26 – осі кріплення коліс; 21, 22 – зубчасті вінці; 23, 27 – колеса; 24 – фігурні важелі; 25 – вертикальна стійка.

напрямку руху МЕЗ (якщо один із важелів знаходиться в зачепленні із зубчастим вінцем то інший ні) повертаються на осях, та не дозволяють мобільному засобу переміщуватись у зворотному напрямку. Відстань між осями 20 і 26 скорочується до моменту коли вмикач на втулці 6 поверне стопорний важіль 8 та роз'єднає втулку 11 від кільця 9 які до цього моменту поєднували одне ціле. З цього моменту стиснуті пружини 3 за допомогою втулки 6 обертають колесо 27 відносно осі 26. Таким чином відстань між осями 26 та 20 збільшується до моменту коли вмикач 16 не поверне стопорний важіль 13 на осях 10. З цього моменту втулка 11 та кільце 9 складають одне ціле. Процес укрупнення гвинтового вала 15 у різбову втулку 11 повторюється (Petrov, 2014, 1–3; Petrov, 2015, с 1–3).

4. Матеріали та методи досліджень

4.1. Результати дослідження гвинтової передачі енергії від двигуна до колісних рушіїв МЕЗ:

Згідно з розробленою конструкцією мобільного засобу «Гвинторух» при передачі крутного моменту від двигуна до гвинтового вала створюється передаточне відношення:

$$i = \frac{S}{S_1} a; \quad (1)$$

де S – колове переміщення маховика двигуна; S_1 – переміщення гвинтового вала.

У формулі (1) колове переміщення маховика двигуна та переміщення гвинтового вала представляємо у вигляді геометричних параметрів:

$$i = \frac{\pi \cdot d_m}{P_t} \quad (2)$$

де d_m – діаметр маховика двигуна;
 P_t – хід гвинта.

Для розробленого мобільного засобу «Гвинторух» важливо ввести силові показники, які сприяють його переміщенню.

У такому випадку залежність між коловою силою F_t на маховику двигуна та осьовою силою F_a переміщення мобільного засобу представимо у вигляді:

$$F_t = f_a \cdot i \cdot \eta, \quad (3)$$

де η – ККД гвинтової пари.

Змінні параметри для розрахунків заносимо в таблицю 1. В результаті розрахунків в середовищі Excel по формулі (2) отримали данні, які заносимо в таблицю 2.

Для обчислення залежності колового зусилля F_t від осьового зусилля F_a по формулі (3) були отриманні данні, які заносимо в таблицю 2.

Згідно з даними, які наведені в таблиці 1 та таблиці 2, будемо графіки залежностей:

На рис. 4 наведено результати випробувань навантаження колісного рушія, згідно з розрахунковими значеннями, які відображені в таблиці 1 та таблиці 2.

На рис. 5 а. загальний вигляд автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою, на рис. 5 б. мобільний енергетичний засіб з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою при відсутності руху (дискомфорт опорної поверхні), на рис. 5 в. мобільний енергетичний засіб з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою в динаміці (початок руху).

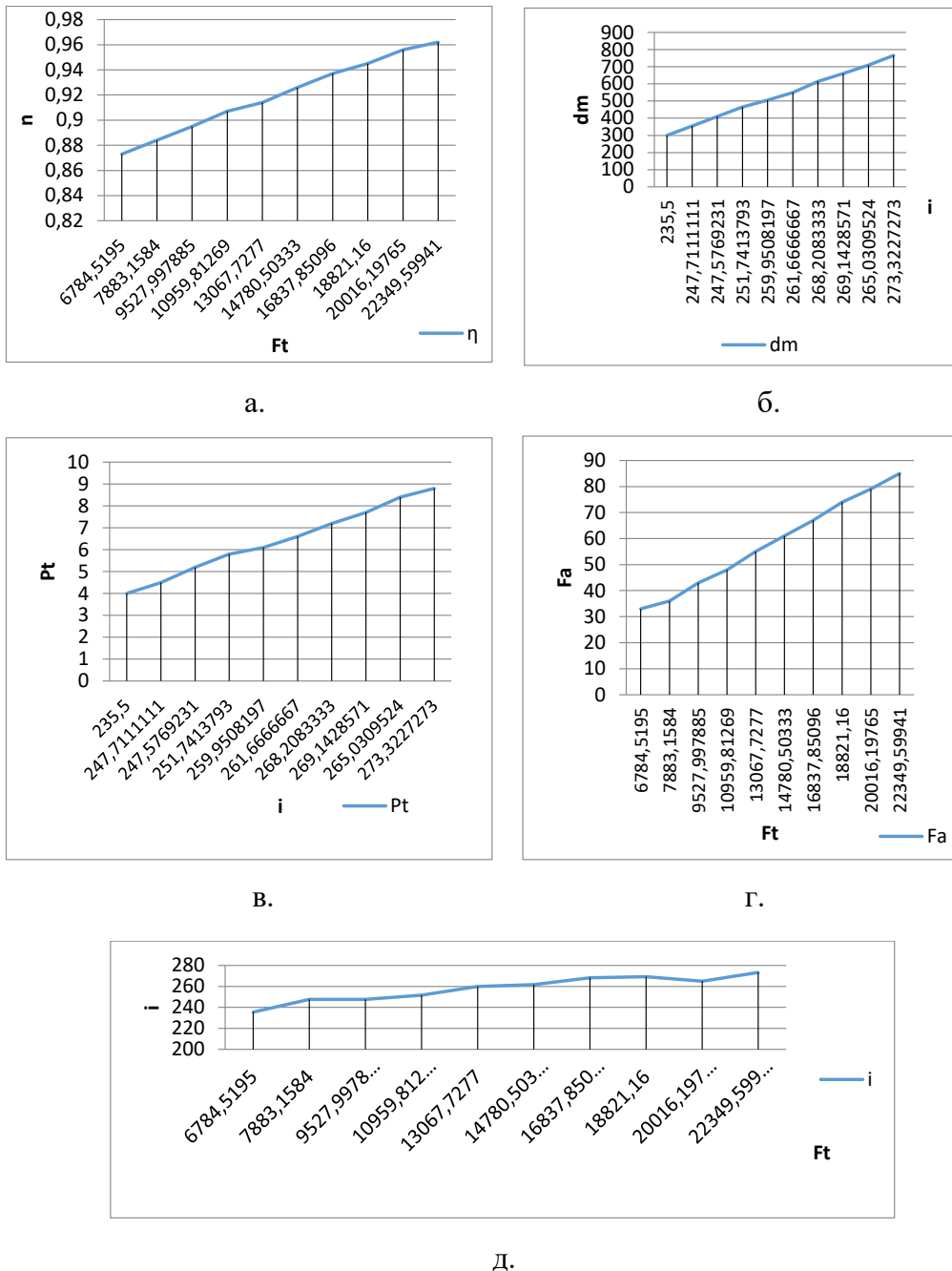


Рис. 4. Результати випробувань навантаження колісного рушія:

а–графік залежності ККД гвинтової передачі від колового зусилля $\eta = f(F_t)$; б–графік залежності діаметра маховика від передаточного відношення $d_m = f(i)$; в– графік залежності ходу гвинта від передаточного відношення $P_t = f(i)$; г–графік залежності осьового зусилля від колового зусилля $F_a = f(F_t)$; д– графік залежності передаточного відношення від колового зусилля $i = f(F_t)$.

Таблиця 1

Змінні параметри

η	0,873	0,884	0,895	0,907	0,914	0,926	0,937	0,945	0,956	0,962
dm	300	355	410	465	505	550	615	660	709	766
P_t	4	4,5	5,2	5,8	6,1	6,6	7,2	7,7	8,4	8,8
F_a	33	36	43	48	55	61	67	74	79	85

Таблиця 2

Результати розрахунків

i	235,5	247,71	247,58	251,74	259,95	261,67	268,21	269,14	265,03	273,32
F_t	6784,5	7883,2	9528	10960	13068	14781	16838	18821	20016	22350

Теоретичне дослідження автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою.

З метою опису руху автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою складаємо його рівняння руху, рис. 5. а. Для складання цього рівняння автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою замінемо ролики 15 та 16 одним та припустимо, що технологічна вага m буде рухатись по гнучкій напрямній 14 (Vikovich, Cherevko, Zinko, 2018, 166; Zinko, Kraiynik, Gorbaiy, 2019, 256; Kubich, 2020, 195).

Зобразимо активні сили:

P – вага технологічної платформи

P_t – сила тяги, яка діє від штока 7. Вивільнимо точку M від зв'язків, заміненою чи дію зв'язків реакцією. Зв'язком являється шорсткість гнучкої напрямної 14. Реакцію гнучкої напрямної розкладаємо на дві складові:

X – нормальна складова та F – дотична складова (сила тертя, ковзання).

Пов'яжемо з технологічною платформою вісі координат. Тоді диференціальне рівняння руху технологічної платформи у звичайній формі буде мати вигляд:

$$m = \frac{d\theta}{dt} = R_\tau, \quad m \frac{\theta^2}{r} = R_n \quad (4)$$

У векторній формі рівняння руху буде мати вигляд:

$$R_\tau = P_\tau + F_\tau + N_\tau + P_{T\tau} \quad (5)$$

$$R_n = P_n + F_n + N_n + P_{Tn} \quad (6)$$

Після математичних перетворень рівнянь (4) отримуємо загальне рішення диференціального рівняння руху технологічної платформи та автомобіля, яке буде мати вигляд:

$$V^2 = e^{-2\varphi+c} + A \cos \varphi + B \sin \varphi \quad (7)$$

Для визначення вільної постійної c складаємо початкові умови:

При прийнятих початкових умовах:

$$t = 0; \varphi(0) = 0; V(0) = 0$$

Після підставлення початкових умов руху автомобіля у рівняння (2.12), отримуємо:

$$-A = e^c$$

Тоді остаточне рівняння руху автомобіля приймає вигляд:

$$V^2 = -A_e^{-2\varphi} + 2fg \cos \varphi + 2g \sin \varphi$$

$$V^2 = -2gfe^{-2\varphi} + 2fg \cos \varphi + 2g \sin \varphi$$

5. Результати досліджень

Проект автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою

5.1. Опис конструкції автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою

З метою підвищення ККД трансмісії автомобіля та зменшення витрат палива на переміщення завантаженого автомобіля запропоновано спосіб переміщення автомобіля «Верблюд» Л.М. Петрова, який виконувався на модернізованій трансмісії, автозаводу України, автомобілі КрАЗ-5233.

На рисунку 11 показано креслення автомобіля з модернізованою трансмісією у нерухомому стані. Спосіб переміщення автомобіля «Верблюд» включає: двигун 1, колісні рушії 2, привід 3 до колісних рушіїв 2. До напіврама 4 приєднано циліндр 5 в якому з можливістю переміщення розташований поршень 6 зі штоком 7. У циліндрі 5 між торцевою стінкою 8 та поршнем 6 розташована пружина стиснення 9. Пружний елемент 10 одним кінцем за допомогою елемента, що з'єднує 11 закріплено на штоку 7 та підрамником 12, а другим кінцем хомутом 13 приєднано до циліндра 5. На пружному елементі 10 закріплено гнучку напрямну 14. В напрямній 14 з можливістю переміщення на роликах 15 та 16 розташовані циліндри 17 та 18, які закріплено на гравітаційній вазі 19. У циліндрі 17 розташовані отвори 20 і 21, а у циліндрі 18 розташовані отвори 22 та 23 при цьому отвір 20 з'єднано з отвором 23, а отвір 21 з'єднано з отвором 22. До підрамника 12 приєднано з можливістю обертання колесо 24.

Спосіб переміщення автомобіля «Верблюд» Л.М. Петрова виконують таким чином. Під час переміщення автомобіля від двигуна 1 приводом 3 подають крутний момент колісним рушійам 2. Автомобіль починає рухатись. При цьому виконують наступні операції. Напівраму 4 разом з циліндром 5 переміщують у напрямку руху автомобіля, а шток 7 разом з підрамником 12 та колесом 24 пружиною стиснення 9 пригальмовують рух колеса 24 разом з'єднуючим елементом 11 закріпленим на штоку 7 та підрамнику 12. Пружина стиснення 9 розтягується, пружний елемент 10 деформується у зворотному напрямку під дією гравітаційної ваги 19. Гравітаційна вага 19 під дією інерційної складової переміщується на роликах 15 та 16 по напрямній 14 відслідковує переміщення випуклості пружного елемента 10 в зворотному напрямку по відношенню до напрямку руху автомобіля. Таким поєднанням взаємопов'язаних операцій між колісними рушійми 2 та підтримуваними колесами 24 накопичується потенційна енергія (Gorbaiy, Zinko, Kernickiy, 2017, 18–25).

На рис. 6. представлено графічне відображення руху автомобіля по способу «Верблюд».

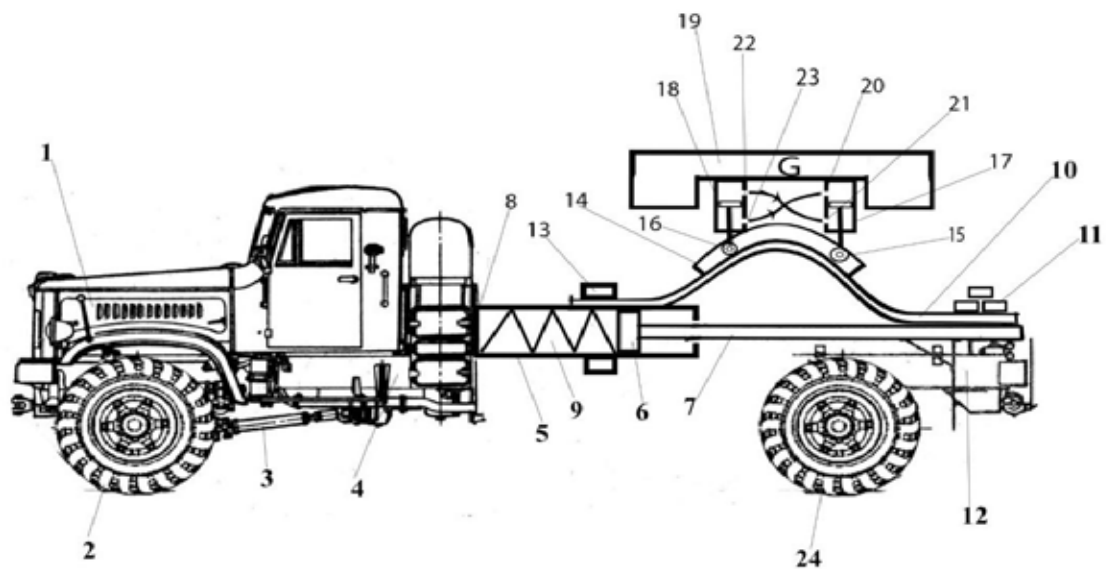
6. Висновки

В результаті проведених досліджень автомобіля з модернізованими колісними рушійми:

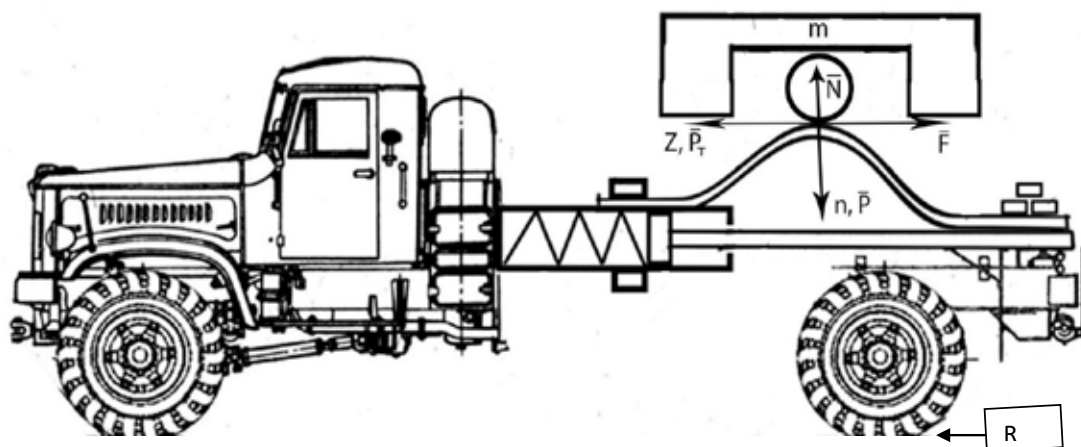
1. Проведений патентний пошук напрямків модернізації колісних рушіїв в конструктивному удосконаленні ходової системи вантажних автомобілів з застосуванням накопиченої потенціальної енергії з перетворенням її в рух автомобіля.

2. Для модернізації колісного рушія запропоновано в зону плями контакту та виходу з неї включити рухому вагу в межах підйомовантажності автомобіля (10000Н–0000Н), яка діє на гнучкий елемент включений до трансмісії вантажного автомобіля.

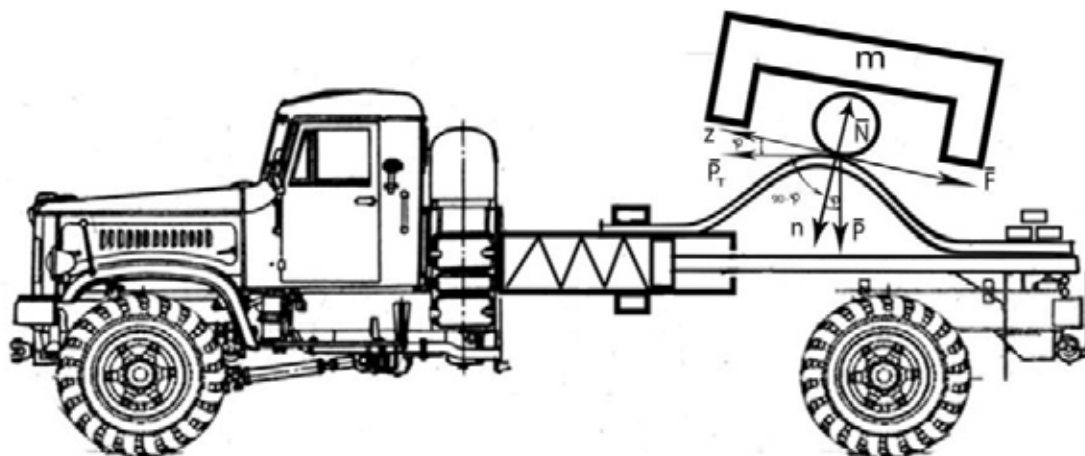
3. Проведені досліди на полігоні ОФ НАТІ виявили перевагу модернізованих колісних рушіїв в порівнянні з існуючими в силі тяги на 15%



а.



б.



в.

Рис. 5. Схема вантажного автомобіля, які підлягали дослідженню:

а– загальний вигляд автомобіля з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою; б– мобільний енергетичний засіб з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою при відсутності руху (дискомфорт опорної поверхні); в– мобільний енергетичний засіб з енерго-резонаторною міжмостовою насадкою в динаміці (початок руху).

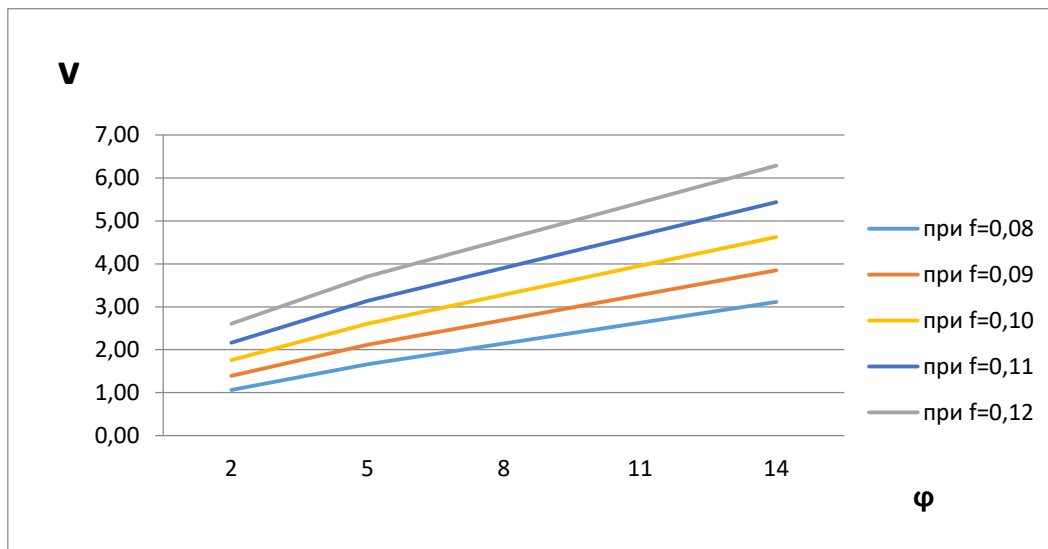


Рис. 6. Графічне відображення руху автомобіля по способу «Верблюду»

4. По результатам дослідів було побудовано графічні залежності руху автомобіля від кута нахилу гнучкого елемента (15–35°).

5. По результатам проведених досліджень було оформлено матеріали на декларативний патент і які було направлено до Укрпатенту.

Бібліографічні посилання:

- Petrov L.M. (2015) Sposib peremischennia mobilnogo energetichogo zasobu [Method of moving a mobile energy supply] Kyiv: Bul. № 1 (in Ukrainian).
- Petrov L.M. (2014) Sposib peremischennia mobilnogo zasobu [Method of moving a mobile energy supply] Kyiv: Bul. № 1 (in Ukrainian).
- Gorbaiy O.Z., Zinko R.V., Kernicki I. S (2017) Prostorovi sektsiini moduli kolisnykh transportnykh zasobiv: Visnyk Natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika» Seriya: DYNAMIKA, mitsnist ta konstruktsiia mashyn i pryistroiv [Spatial sectional modules of wheeled vehicles. Bulletin of the National University of "Lviv Polytechnic" Series: Dynamics, Strength and Design of machines and devices] Lviv: № 866. p. 18–25. (in Ukrainian).
- Vikovich, I.A., Cherevko Y.M., Zinko R.V. (2018) Znizhennia dyynamichnykh navantazhen u vantazhykh kolisnykh mashinah iz pruzho-dempfuvalnym zchlenuvanniam [Reduction of dynamic loads in wheeled trucks with elastic-damping joint]: monograph. of Lviv: Galician Publishing, 166 c. (in Ukrainian).
- Zinko R.V., Kraiynik L.V., Gorbaiy (2019) O.Z. Osnovy konstruktivnogo sintezu ta dynamika spetsialnykh avtomobiliv i tekhnologichykh mashyn [Basics of constructive synthesis and dynamics of special cars and technological]: monograph. of Lviv: Publishing house Lviv Polytechnic, 256 p. (in Ukrainian).
- Kubich V.I. (2020) Osoblivosti konstruktsii vsydykhidnykh kombinovanykh kolisnykh rushiiv [Design features of all-terrain combined wheeled engines]: textbook. Zaporizhia: National University "Zaporizhia Polytechnic", 195 c. (in Ukrainian).

Petrov L. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Academy, Odessa, Ukraine

Kishianus I. V., Senior Lecturer, Military Academy, Odessa, Ukraine

Maslich N. Ya., Candidate of Technical Sciences, Professor, Military Academy, Odessa, Ukraine

Skorichenko O. I., Teacher, Military Academy, Odessa, Ukraine

ELEMENTS OF THE THEORY OF FLEXIBLE TRANSMISSION OF TRUCKS

The working process of wobbling of wheeled *pyuшя* is accompanied by loading of wheeled wheelby gravitational force that results in a clench and stretch of tire during her deformation. In the article the considered questions of research of the mechanical system "motor-car resilient element reactive push" are with the use of theorem about the change of kinetic energy of this system, general equalization of dynamics, and also equalization of Lagrange the second family.

The aim of the study is to improve the technological scheme of loading the wheel drive, converting the energy supplied to the wheel drive into the rotational motion of the spring jet with increasing traction of the car, which is an auxiliary factor to innovative technology of its movement.

The scientific and practical direction of work is that for the first time a technology is proposed in which the energy of rotational motion of the mechanical system "car wheel-spring jet" is used to rotate the wheel drive, which allows to increase the realization of torque on the wheel.

The methodology of the study was to establish a mathematical relationship between the force generated by a "car wheel-spring jet" with the dynamic mobility of the car itself.

A research result is the worked out construction of car with a dynamically movable platform in the loop of damping a "motorcar wheelspring reactive push" that works at "physical discomfort of underlayment". At opening concepts "physical discomfort of underlayment" were used differential equalizations that mathematically confirm the origin of such surface in certain external of car environments. Calculations were performed in an environment EXEL with respects to the relationship between input and output parameters. The results of the research were implemented in graphical dependencies $\eta = f(F_v)$, $d_m = f(i)$, $P_t = f(i)$, $F_a = f(F_v)$, $i = f(F_v)$.

The value of the study, the results of this work will contribute to the automotive industry.

The proposed car model is suitable for use in order to increase the traction capacity of the vehicle.

Key words: physical and mathematical model, propulsion, wheel, wheel-elastic compensator.

Дата надходження до редакції: 09.12.2021 р.

ТЕОРІЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ З РОЗШИРЕНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

Петров Леонід Миколайович
кандидат технічних наук, доцент
Військова академія, м. Одеса, Україна
ORCID: 0000-0001-5709-9986
leonid.petrov2@gmail.com

Петрик Юрій Миколайович
старший викладач
Військова академія, м. Одеса, Україна
ORCID: 0000-0003-4589-4282
leonid.petrov2@gmail.com

Характер сучасних технологічних операцій за допомогою мобільних енергетичних засобів (МЕЗ) вимагає високої їх мобільності та працездатності. Переміщення МЕЗ в більшості випадків, як правило, здійснюється в несприятливих дорожніх умовах, бездоріжжі з мінімальним використанням допоміжних засобів поліпшення пересуванню автомобіля та засобів «стримання» рухомості.

Від МЕЗ залежить безпосередньо і підтримання якості виконання самих технологічних операцій, зокрема як тягове навантаження, так і систем підтримки сили тяги, швидкості руху. Виходячи з цього, новітні технології поліпшення пересування МЕЗ є запорукою успішного проведення технологічних операцій. Основними напрямками реалізації цієї мети є: глибока модернізація наявних ходових систем автомобільної та допоміжної техніки з використанням новітніх технологій, що доведе їх технологічну придатність до можливості та рівня стандартів Європейського Союзу.

Створення українського МЕЗ може бути розміщене на базі повнопривідного шасі, що створене за спеціальними технічними вимогами до конструктивного удосконалення ходової системи.

МЕЗ яке буде призначене для монтажу чи під'єднання установок спеціального призначення – колісний рушій з глибокою модернізацією. Такий рушій може бути обладнаний спеціальною біговою доріжкою для переміщення динамічної ваги, що дозволяє зменшити буксування і забезпечення стабілізації заданого напрямку руху. У такій глибокій модернізації конструкції передбачено кріплення важеля для керуванням підпружиненими динамічними вагами. Така технологія переміщення автомобіля за допомогою навантаження колісного рушія дозволяє кочення колеса та його навантаження зробити більш м'якішим, що зменшує шум при пересуванні та більш якісно використовувати технологічне тягове навантаження.

Складено математичну модель руху МЕЗ з колісним рушієм навантаженим динамічними вагами.

Ключові слова: технологія, операція, модель, енергетичний засіб, колесо, стабілізація, важіль.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.5>

Вступ

Одне з найважливіших завдань вирішення продовольчої проблеми будь-якої країни – всевітнє підвищення ефективності с.-г. виробництва, насамперед, шляхом зниження енерговитрат на обробіток ґрунту й усунення негативного впливу енергетичних засобів (тракторів, комбайнів, автомобілів) на ґрунтову екологію, а також розробка передових технологій обробітку сільгоспкультур, які забезпечують збереження родючості земель.

Задля зниження ущільнювальної дії на ґрунт колісних тракторів до допустимого рівня, зменшення опору руху машин ґрунтом, підвищення тягово-зчіпних властивостей тракторів використовують шини, що мають більший діаметр і ширину, регулярно перевіряють у них тиск і змінюють його відповідно до виконуваної агротехнічної операції і навантаження, агрегатують трактор за нижчого баластного навантаження, яке забезпечує рух без значного буксування, використовують передні і задні здвоєні шини.

Усі вказані способи спрямовані на збільшення площі контакту шини з ґрунтом, що напряму впливає на зниження питомого тиску рушіїв на нього. Так, наприклад, зниження тиску повітря від 0,18 до 0,08 МПа в шинах 16,9R30 засвідчило, що за навантаження на колесо в 16,07 кН максимальний тиск на ґрунт знижується на 33%. У зв'язку з тим, що нормальні навантаження на колеса трактора змінюються в широких межах, а трактори працюють на ґрунтах із різною деформацією, рівень внутрішнього тиску повітря в шинах рекомендується заводом-виробником із деяким запасом, що унеможливує перевищення деформацій понад допустимі межі. Так, для шини 15,5R38 (трактор МТЗ-80) мінімально допустимому рівню тиску – 0,098 МПа – відповідає нормальне навантаження – 14,27 кН, а трактор під час роботи на холостому ході створює навантаження на шину всього лишень 10,5 кН. Колесо в таких умовах працює як жорстке, що спричинює збільшення деформації ґрунту. Таким чином, слід систематично регулювати

тиск у шинах залежно від навантаження на них і типу ґрунту. Також краще застосовувати, замість діагональних, радіальні шини. Їхня перевага – у збільшеній площі контакту з опорною поверхнею, зниженому тиску повітря за однакової здатності витримувати вертикальні навантаження і аналогічних типорозмірів порівняно з діагональними шинами. Колісні трактори, обладнані радіальними шинами, забезпечують менший (на 20–25%) тиск на ґрунт і мають вищу прохідність під час роботи на м'яких ґрунтах. Ефективним способом підвищення тягово-зчіпних якостей, зменшення питомого тиску на ґрунт і поліпшення прохідності трактора є збільшення площі контакту рушіїв із ґрунтом шляхом застосування широкопрофільних, аркових, шин напівгусеничного ходу та здвоєних коліс.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Відомо спосіб переміщення мобільного енергетичного засобу (Molodan, 2019, р. 48–53), який включає (Рис. 1, 2): двигун 1, який встановлюють на колісний рушій 2 та ведені колеса 3. Колісні рушії та ведені колеса встановлюють на опорну поверхню 4. Локальні пружні елементи 5 закріплюють на основному протекторі 6 фіксуючими штифтами 7. Спосіб переміщення мобільного засобу здійснюють наступним чином. Від двигуна 1 за допомогою трансмісії (на кресленні не показано) крутний момент передають колісним рушійам 2. Мобільний засіб починає рухатись на ведених 3 та ведучих 2 колесах. В зоні плями контакту колісних рушіїв з опорною поверхнею 4 локальний пружний елемент 5, вигнутий до початку деформації шини в зону прилягання до основного протектора 6, стрімко вигинається у протилежну сторону, тобто, в напрямку до контакту з опорною поверхнею 4. Це пояснюється тим, що протектор шини розтягується і вигнутий у його сторону локальний пружний елемент при розтягуванні основного протектора вигинається у протилежну сторону.

Таким чином, у зоні плями контакту шини з опорною поверхнею створюють імпульс локального пружного

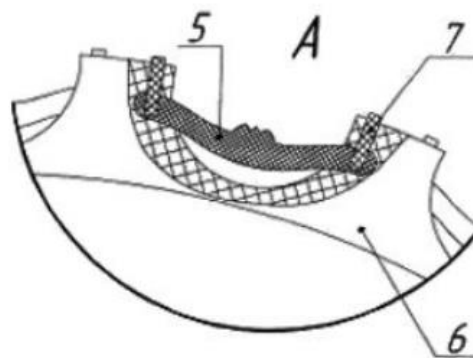


Рис. 2. Деформаційний елемент у протекторі

елемента, швидкість зміни якого дорівнює сумарній силі, що діє на локальний пружний елемент. Таким чином, періодична дія імпульсу локального пружного елемента в зоні плями контакту шини колісного рушія з опорною поверхнею дозволяє підвищити ефективність використання потужності двигунів трактора, зменшити буксування коліс та питому витрату палива.

Відомий спосіб Петрова-Борисенка підвищення прохідності тяговотранспортної системи (Molodan, 2018, р. 14–18), який включає (Рис. 3, 4, 5) колісний рушій 1, на якому закріплений зубчастий протектор 2. Колісний рушій встановлений на ступицю 3 тягово-транспортної системи. До ступиці хомутами 4 та 5 жорстко закріплений керуючий циліндр 6, в корпусі 7 розташований поршень 8, до якого приєднані штоки 9 та 10, на які вільно насунені пружини 11, 12 стиснення. Шарнірами 13 та 14 до протектора приєднаний накладні зубчасті протектори 15 та 16, форма зубців 17 та впадин 18 яких відповідає формі зубців 19 та впадин 20 протектора колісного рушія. Аналогічно форма зубців 21 та впадин 22 накладного зубчастого протектора 16 відповідає формі зубців 19 та впадин 20 протектора колісного рушія. Вільні кінці накладних протекторів 15 та 16, шарнірами 23, 24

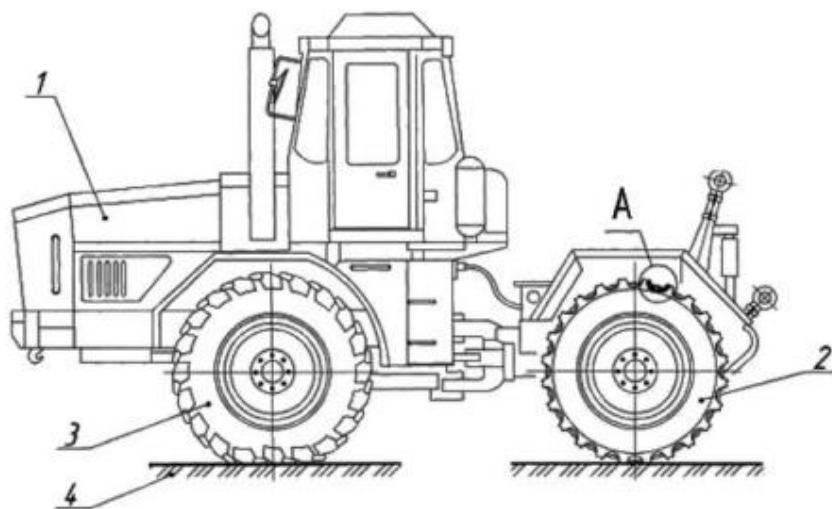


Рис. 1. Мобільний засіб виконаний з деформаційним елементом по декларативному патенту «Спосіб переміщення мобільного засобу»

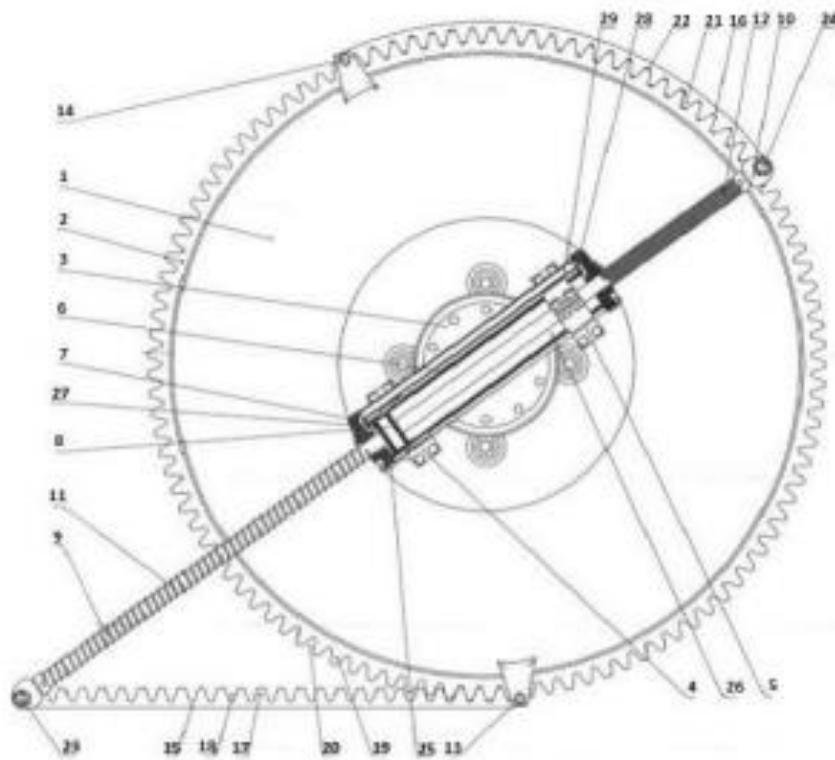


Рис. 3. Креслення згідно способу Петрова-Борисенка, щодо підвищення прохідності тягово-транспортної системи

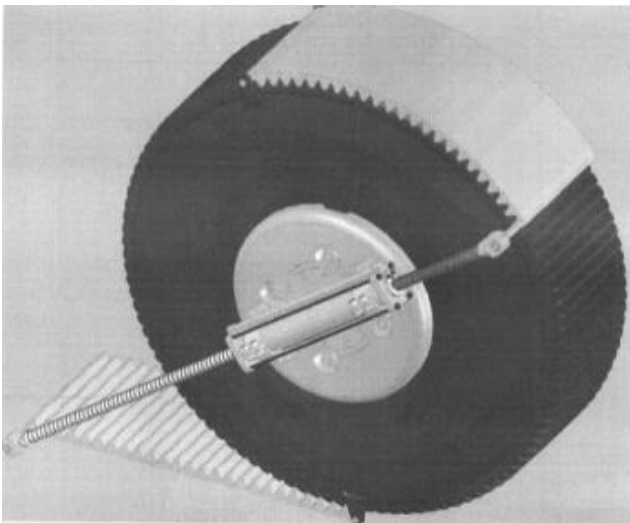


Рис. 4. Загальний вигляд колісного рушія по декларативному патенту «Спосіб Петрова-Борисенка підвищення прохідності тягово-транспортної системи»

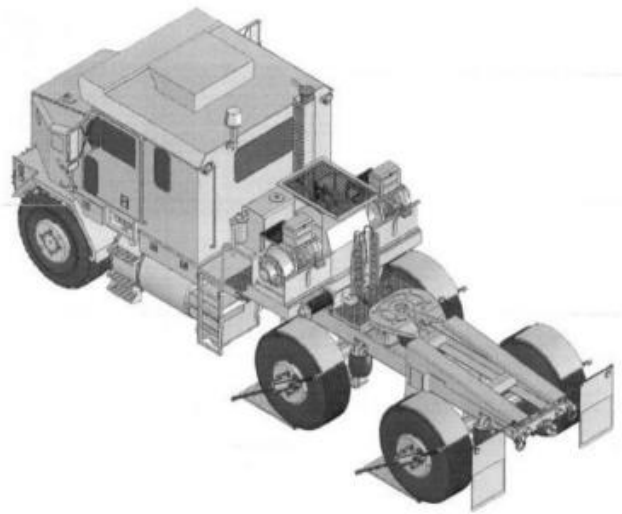


Рис. 5. Загальний вигляд автомобіля з удосконаленими колісними рушіями

з'єднані зі штоками 9, 10. Порожнини 25 і 26 циліндра з'єднані отворами 27 і 28 та проводом 29 з'єднані між собою. Робочий процес підвищення прохідності тягово-транспортної системи, здійснюється таким чином: до ступиці 3 від двигуна через трансмісію (яка на кресленні не показана) підводиться крутний момент. При цьому ступиця 3 приводить в обертальний рух колісний рушій 1. Разом з колісним рушієм 1 приводиться в оберталь-

ний рух зубчастий протектор 2 та закріплений хомутами 4, 5 керуючий циліндр 6 разом з поршнем 8 та штоками 9, 10 і пружинами 11, 12. При цьому зубчастий протектор 2 зубцям 19 втискується у впадини 18 13 накладного протектора 15, а зубці 17 накладного протектора втискуються у впадини 20 зубчастого протектора 2 колісного рушія 1. Обертаючись, колісний рушій 1 шарніром 13 примушує накладний протектор 15 вигинатися, охоплю-

ючи зубці 19 колісного рушія 1, а шарнір 23 притискає до опорної поверхні накладний протектор 15. Одночасно шток 9 з поршнем 8 переміщується в напрямку вільної зони від навантаження колісного рушія 1, на якій розташований шарнір 24. При цьому шарнір 23 разом зі штоком 9, під час обертання колісного рушія 1, переміщується до осередку колісного рушія 1, стискаючи пружину 11, а шарнір 24 рухається в напрямку вільної зони колісного рушія, 1 розгортаючи накладний протектор 16. При цьому пружина 12 розтягується, зубці 21 накладного протектора 16 звільняються із впадин 18 зубчастого протектора 2, а впадини 22 накладного протектора 16 вивільняють зубці 19 зубчастого протектора 2 колісного рушія 1. Таким чином створюється зона майбутньої «плями контакту» між шарнірами 14 та 24. Переміщення поршня 8 по керуючому циліндру 6 ближче до зони вільної від навантаження колісного рушія 1 примушує рідину із порожнини 22 керуючого циліндра 6 через отвір 28 та провід 29 і отвір 27 перейти в порожнину 25, забезпечуючи стабілізацію положення поршня 8 згідно з кутом повороту колісного рушія 1 відносно опорної поверхні.

Таким чином, запропонований спосіб «Петрова-Борисенка підвищення прохідності тягово-транспортної системи» створює додаткову штучну опорну поверхню для тягово-транспортної системи, розширює можливості колісного рушія 1 для збільшення його тяги та поєднує можливості колісного та гусеничних рушіїв. Застосування накладного протектора на колісний рушій, який навантажений і сегмент навантаження якого визначають центральним кутом повороту деформованої опорної поверхні, дозволяє підвищити прохідність тягово-транспортної системи, створити додаткову штучну опорну поверхню для тягово-транспортної системи, розширити можливості колісного рушія для збільшення його тяги та поєднати функції колісного та гусеничних рушіїв. Такий перелік операцій дозволяє розширити можливий діапазон тягової динаміки тягово-транспортної системи, змен-

шити час на її розгін та підвищити мобільність тягово-транспортної системи.

Відомий спосіб «Лягушка» переміщення мобільного енергетичного засобу конструкції Л.М. Петрова (Kolrahchyan, 2015, р. 125–136), який здійснюють таким чином (Рис. 6): від енергетичного модуля 1 крутний момент за допомогою кінематичного зв'язку подається на центральний редуктор 2. За допомогою карданних шарнірів 15, 16 та 17, 18 карданних валів 19, 20 крутний момент подається на кінцеві передачі 21, 22 колісних рушіїв 10, 11. Таким чином мобільному енергетичному засобу надають рух. При зміні опору руху на передніх чи задніх колісних рушіях пружинним елементом примушують передній колісний рушій (при виникненні на ньому додаткового опору) перестрибнути через бар'єр чи підтягнуть задні колісні рушії (при виникненні на них додаткового тягового опору) перестрибнути через цей бар'єр.

Мета та завдання дослідження

Мета: вдосконалення технології передачі крутного моменту від двигуна до колісних рушіїв шляхом створення нової конструкції колісного рушія мобільного енергетичного засобу.

Завдання: розробити конструкцію тягового МЕЗ з колісними рушіями, які навантажені динамічними вагами.

Викладення нового матеріалу

Уявимо собі, що по гладкій внутрішній поверхні диска колеса МЕЗ з верхньої його частини перекочується вага. Колесо МЕЗ рухається з постійною швидкістю u_0 , рис. 1, (Petrov, 2009, р. 1-3; Petrov, 2014, р. 1-3).

Мета: визначити яку швидкість вага буде мати в зоні плями контакту, тобто, коли вага буде в зоні контакту шини з опорною поверхнею.

Зв'яжемо осі координат з колесом МЕЗ, рис. 2.

Для вирішення поставленої задачі використовуємо закон змінення механічної енергії і ваги за час, від початку її руху від верхньої частини диска до нижньої тобто, коли вага буде в нижній точці диска.

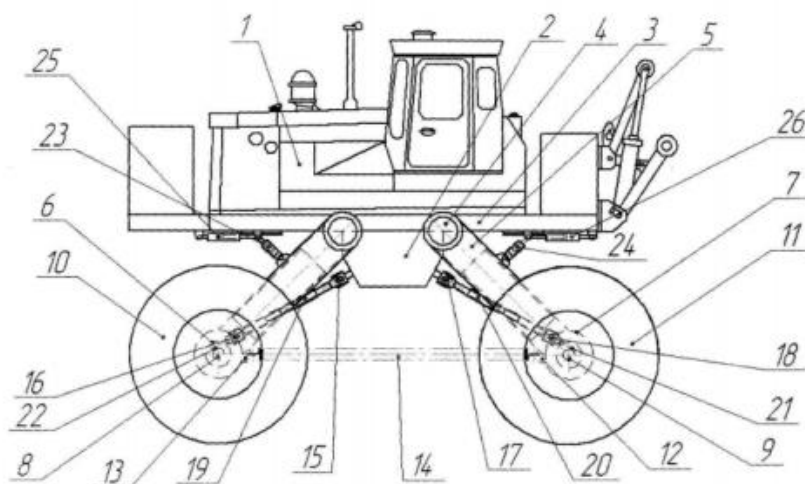


Рис. 6. Мобільний засіб виконаний по декларативному патенту «Спосіб «Лягушка» переміщення мобільного енергетичного засобу конструкції Л.М. Петрова»

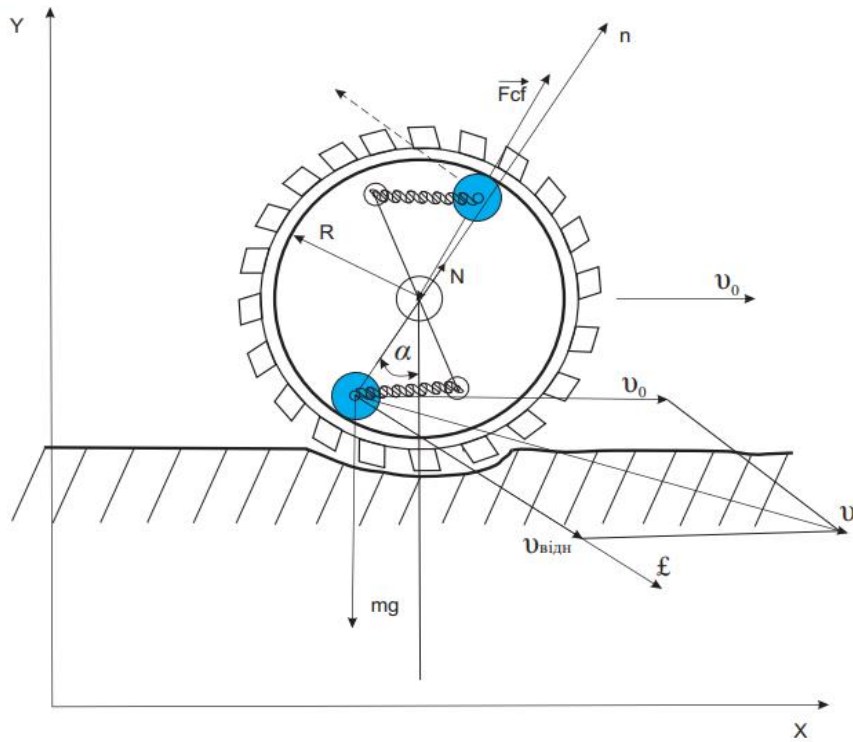


Рис. 7. Колесо МЕЗ з додатковою динамічною вагою

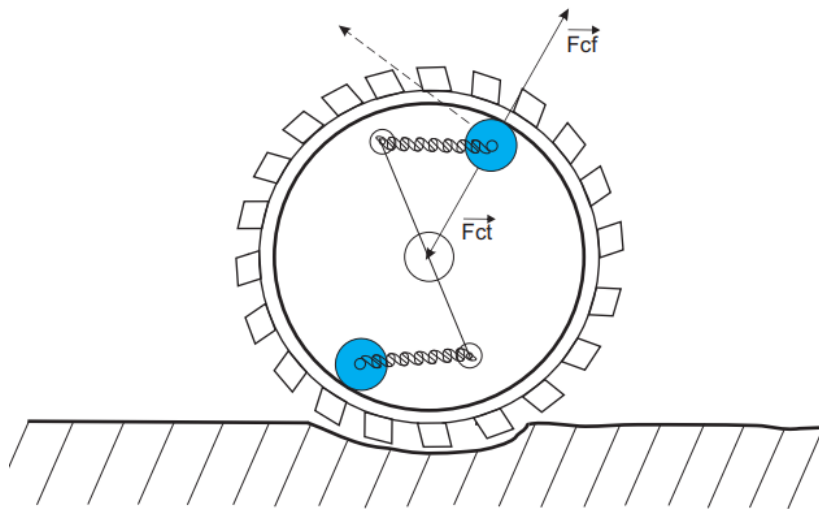


Рис. 8. Фізична модель колеса МЕЗ з додатковою динамічною вагою

Змінення механічної енергії рухомої ваги при її русі від верхньої точки диску до нижньої точки диску буде представлено різницею потенційної та кінетичної енергії.

$$(E_b^n + E_b^k) - (E_h^n + E_h^k) = A \quad (1)$$

де $E_b^n - E_h^n = mgr$ – змінення потенційної енергії за розглядаємий інтервал часу

$E_b^k - E_h^k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$ – зміна кінетичної енергії рухомої ваги за розглядаємий інтервал часу;

A – робота зовнішніх сил.

Зовнішньою силою згідно, рис. 2 являється сила нормальної реакції, яка діє зі сторони диску колеса МЕЗ на динамічну вагу.

Робота цієї сили за невеликий проміжок часу Δt може бути представлена формулою:

$$\Delta A = N * v dt \quad (2)$$

Для визначення сили N використовуємо природні осі системи координат, які зв'яжемо з колесом МЕЗ. З цією метою запишемо рівняння руху ваги відносно природних осей системи координат в проекціях на нормальну n та тангенціальну t осі (Lobas, 2008, p. 331-335).

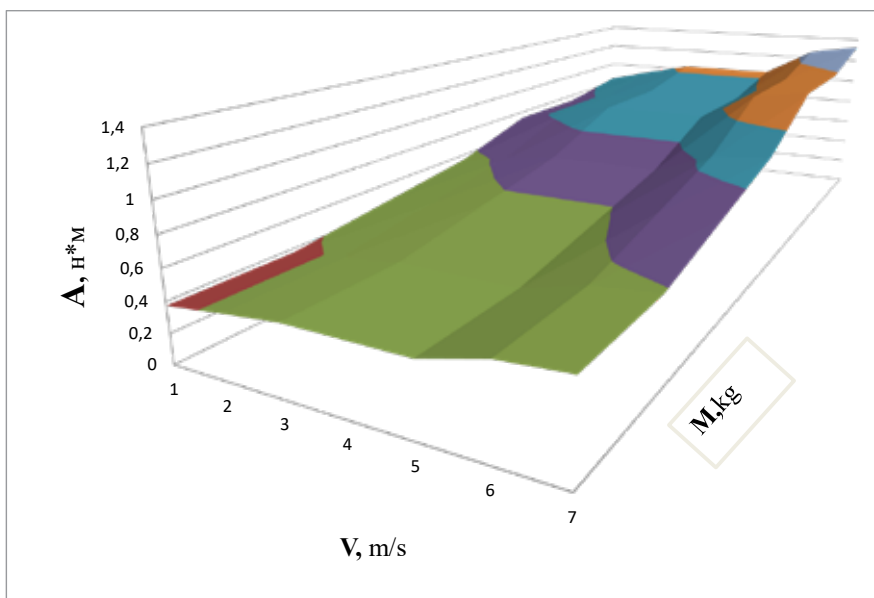


Рис. 9. Графік залежності роботи A , яку здійснює сила нормальної реакції опору в природній системі відліку

$$\frac{mv_{\text{відн}}^2}{R} = N - mq \cos \alpha \quad (3)$$

Після диференціювання отримуємо

$$\frac{mdv_{\text{відн}}}{dt} = mq \sin \alpha \quad (4)$$

де m - маса динамічної ваги;

v від n модуль швидкості рухливої ваги відносно диску колеса МЕЗ;

α кут між віссю n та вертикальною віссю.

У наведеній системі відліку яку нами пов'язано з колесом МЕЗ, рухлива вага рухається по колу радіуса R , отже:

$$v_{\text{відн}} = -R \frac{d\alpha}{dt} \quad (5)$$

Узагальнену швидкість руху динамічної ваги відносно природної системи відліку осей координат буде:

$$v = v_0 + v_{\text{відн}} \quad (6)$$

За допомогою попередніх рівнянь можна визначити кінематичні характеристики руху досліджуємої ваги.

Елементарна робота, яку виконує динамічної ваги:

$$\delta A = mv_0 \sqrt{\frac{qR \cos \alpha}{2}} \sin \alpha * d\alpha \quad (7)$$

Робота A , яку здійснює сила нормальної реакції опору в природній системі відліку та інтервалі часу від початку руху до моменту попадання динамічної ваги в зону плями контакту колеса МЕЗ з опорною поверхнею буде мати вигляд, формула 10:

$$A = \int_{\frac{\pi}{2}}^0 mv_0 \sqrt{\frac{qR \cos \alpha}{2}} \sin \alpha d\alpha \quad (8)$$

$$A = m\sqrt{2qRV_0} \quad (9)$$

Отримана формула для роботи A динамічної ваги дозволяє отримати закон зміни механічної енергії колеса МЕЗ:

$$mqR + \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = m\sqrt{2qRV_0} \quad (10)$$

Тоді шляхом рішення наведеного рівняння, відносно швидкості рухливої ваги в зоні плями контакту колеса МЕЗ з опорною поверхнею, отримуємо формулу швидкості для колеса МЕЗ:

$$v = V_0 + \sqrt{2qR} \quad (11)$$

Матеріали та методи досліджень

Для виявлення впливу на роботу A , яку здійснює сила нормальної реакції опору в природній системі відліку та інтервалі часу від початку руху до моменту попадання рухомої ваги в зону плями контакту колеса МЕЗ з опорною поверхнею, розглянемо формулу 10 в середовищі EXEL. Отримані результати представимо на графіку 1.

Висновки

В результаті проведених досліджень МЕЗ з модернізованими колісними рушіями:

1. Проведений патентний пошук напрямків модернізації колісних рушіїв МЕЗ дозволив виявити можливі напрямки модернізації колісного рушія з використанням динамічної ваги.

2. Для модернізації колісного рушія запропоновано на диску колеса встановити динамічну вагу.

3. Проведені досліді на полігоні ОФ НАТІ виявили перевагу модернізованих коліс з динамічною вагою в порівнянні з існуючими в силі тяги на 35%

4. По результатам дослідів було побудовано графічну залежність виконаної МЕЗ роботи від швидкості та динамічної ваги.

5. Розроблено макет колеса МЕЗ.

6. По результатам проведених досліджень було оформлено матеріали на декларативний патент і які було направлено до Укрпатенту.

Бібліографічні посилання:

1. Petrov L.M. (2009) «Sposib udoskonalennya obertal'noho rukhu kolisnoho rushiya avtomobilya [Method of improving the rotational movement of the wheel drive of the car]. Kyiv: Patent № 42929, Byul. № 7 (in Ukrainian)
2. Petrov L.M. (2014) «Sposib peremishchennya mobil'noho zasobu» [Method of moving a mobile energy supply] Kyiv: Bul. № 1 (in Ukrainian).
3. Lobas L.H., Lobas Lyudm. H. (2008) «Teoretychna mekhanika: Pidruchnyk dlya studentiv vyshchyykh tekhnichnykh navchal'nykh zakladiv» [Theoretical mechanics: Textbook for students of higher technical educational institutions.] Kyiv: 406 p. p. 331–335. (in Ukrainian).
4. Podryhalo M.A., Abramov D.V., Tarasov YU.V., Efymchuk V.M., (2015) «Énerhetycheskaya ékonomychnost' avtomobilya y krytery yë otsenky,» [Energy efficiency of the car and criteria for its evaluation] Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya. Kharkiv: № 40(1119). p. 28–37. (in Ukrainian).
5. Molodan A.A., Polyanskiy A.S. (2018) «Teoreticheskiye raschety odnositel'nogo dopolnitel'nogo raskhoda topliva pri otklyuchenii tsilindrov», [Theoretical calculations of the relative additional fuel consumption when the cylinders are turned off] Inzheneriya prirodokoristuvannya, Kharkiv: № 2(10). p. 14–18. (in Ukrainian).
6. Podrigalo M.A., Artomov N.P., Abramov D.V., Shulyak M.L., (2015) «Otsenka dopolnitel'nykh energeticheskikh poter pri ustanovivshemsya rezhime dvizheniya transportno-tyagovykh mashin» [Assessment of additional energy losses in the steady state mode of movement of transport and traction machines] Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya, Kharkiv: № 9 (1118),. p. 98–107. (in Ukrainian).
7. Kolpachyan P.G., Zarifyan A.A. (Jr), (2015) “Study of the asynchronous traction drive’s operating modes by computer simulation. Problem formulation and computer model,” Transp. Prob. Int. Sci. J, vol. Kharkiv:10, is. 2,. pp. 125–136. (in Ukrainian).
8. Molodan A.O., (2019) «Pidvyshchennya enerhetychnoyi efektyvnosti kolisnykh mashyn metodom vidklyuchennya tsylindriv v avtotraktornomu dvyhuni» [Improving the energy efficiency of wheeled vehicles by the method of turning on cylinders in an autotractor engine]. Kharkiv: vyp. 10, vyp. 2,. p. 48–53. (in Ukrainian).
9. Molodan A.O., (2018) «Metod vyznachennya dodatkovykh vytrat enerhiyi vyklykanykh nerivnomirnistyu krutnoho momentu dvyhuna pry vidklyuchenni tsylindriv» [A method for determining additional energy inputs for estimating the uneven torque of the engine when the cylinders are turned on], Visnyk mashynobuduvannya ta transportu: Kharkiv: № 2. (in Ukrainian).

Petrov L. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Academy, Odessa, Ukraine

Petryk Yu. M., Senior Lecturer, Military Academy, Odessa, Ukraine

THE THEORY OF WHEELED PROPULSION OF A MOBILE ENERGY VEHICLE WITH ADVANCED ENERGY CAPABILITIES

The nature of modern technological operations with the help of mobile energy means (MEZ) requires their high mobility and efficiency. Movement of MEZ in most cases, as a rule, is carried out in unfavorable road conditions, off-road with minimal use of aids to improve the movement of the car and means of “restraint” mobility.

The maintenance of the quality of the technological operations themselves, in particular both the traction load and the traction force and speed support systems, depends directly on the MEZ. Based on this, the latest technologies to improve the movement of MEZ is the key to successful technological operations. The main directions of realization of this purpose are: deep modernization of the existing running systems of automobile and auxiliary equipment with use of the newest technologies that will prove their technological suitability to possibility and level of standards of the European Union.

Creation of the Ukrainian MEZ can be placed on the basis of the all-wheel drive chassis created according to special technical requirements for constructive improvement of the running system.

MEZ which will be intended for installation or connection of special purpose installations is a wheeled engine with deep modernization. Such a propulsion system can be equipped with a special treadmill to move the dynamic weight, which reduces slippage and stabilizes the specified direction of movement. In such deep modernization of a design fastening of the lever for management of spring-loaded dynamic scales is provided. This technology of moving the car by means of wheel load allows to make the wheel rolling and its load softer, which reduces noise when moving and better use of technological traction load.

A mathematical model of MEZ motion with a wheel drive loaded with dynamic scales is compiled.

Key words: technology, operation, model, energy means, wheel, stabilization, lever.

Дата надходження до редакції: 29.11.2021 р.

УСУНЕННЯ ВІБРАЦІЙ У РАЗІ БАГАТОЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7843-0922

presto5@bigmir.net

Досягти високих показників якості у разі обробки на верстатах важко через вібрації, що знижують продуктивність і точність обробки, надійність і довговічність роботи верстатів, а також стійкість ріжучого інструменту.

Явище вібрацій найбільш повно теоретично і експериментально досліджено під час точіння одним різцем на токарних верстатах.

В опублікованих роботах (Astashev, Korendjasev, Erofeev, 2013; Tchernishev, 2010; Kudinov, 1967; Pashinin, Tchernishev, 2012; Peterson, 2002) не досить уваги приділяється питанню усунення вібрацій у разі обробки металів з використанням багатолезових інструментів: свердел, розгортки, зенкерів, протяжок, фрез, різьбонарізних та інших інструментів. Результати досліджень вібрацій у разі багатолезової обробки не систематизовані, в них не досить уваги приділено впливу вібрацій на продуктивність механічної обробки, стійкість ріжучих інструментів і показники якості деталей – точність, шорсткість і властивості поверхневих шарів деталей. Такі дані набувають особливо великого значення у зв'язку із застосуванням верстатів з ЧПУ, що працюють багатолезовим інструментом (Kak izbezgat vibratsiy na stanke HAAS, 2010). Під час складання програм для цих верстатів повинні враховуватися обмеження на режими різання, які накладаються через можливість появи вібрацій. У разі використання багатолезового різання динамічна система верстата стає більш складною, що вимагає додаткових досліджень для встановлення ділянок режимів обробки, вільних від вібрацій, що гарантує якість деталей. Новизна роботи полягає в комплексному дослідженні впливу вібрацій на роботу складних інструментів: фрез, свердел, протяжок, зенкерів, розгортки та різьбонарізних головок. Це дозволяє розробити рекомендації для стійкої роботи інструменту в умовах використання його у сучасних верстатних системах з обладнанням з ЧПУ.

У статті узагальнені питання, пов'язані з вібраціями у разі багатолезової обробки, розглянуті технологічні фактори, що впливають на інтенсивність вібрацій. Особлива увага приділяється технологічним методам усунення вібрацій у разі багатолезової обробки шляхом вибору раціональних режимів різання, оптимальної конструкції ріжучих пластин багатолезових інструментів, а також шляхом застосування різних пристроїв, що гасять вібрації.

Основою для написання статті є розробки автора, пов'язані з вібростійкою багатолезовою обробкою, а також розробки, виконані іншими вітчизняними та зарубіжними фахівцями (Kudinov, 1967; Tchernishev, 2010; Li, 2011; Zhu, 2015).

Ключові слова: вібрації, коливання, динамічна система, точність, якість обробки.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.6>

Мета роботи – підвищення продуктивності та якості обробки багатолезовим інструментом за рахунок визначення ділянок режимів різання, що забезпечують стабільну роботу інструменту, та застосування пристроїв для гасіння вібрацій.

Викладення основного матеріалу. Багатолезове точіння широко застосовується в обробці деталей на універсальних токарних верстатах, верстатах-автоматах та верстатах з ЧПУ.

Експериментальними дослідженнями встановлено (Kudinov, 1967), що загальна вібростійкість металорізальних верстатів підвищується зі збільшенням числа ріжучих кромок, які одночасно беруть участь у різанні. Під час багатолезового точіння різці можуть розташовуватися по двох схемах: у площині, перпендикулярній до основи верстата, і в площині, паралельній цій осі. У разі перпендикулярності до основи верстата динамічна система верстата може бути представлена декількома контурами зв'язку (рис. 1, а), число яких дорівнює числу одночасно ріжучих кромок. Сила

різання P виникає на одному з різців, передається через різцетримач на еквівалентну пружну систему верстата і викликає відповідну реакцію пружної системи у вигляді переміщення її ланок у відповідному напрямку. В цьому випадку для різних різців ця дія викликає різні зміни перетину зрізів. Позаяк на пружну систему діють сили різання, то відповідна реакція пружної системи буде виражатися сумарним переміщенням, яке в кожний момент часу буде різним за величиною і напрямком.

У разі паралельності до осі, тобто у процесі багатолезового повздовжнього точіння різцями, які закріплені на одному супорті, динамічна система верстата являє собою замкнутий контур, що складається з декількох паралельно працюючих елементів, які пов'язані між собою однією загальною ланкою – еквівалентною пружною системою (рис. 1, б). Система сил різання своєю дією на динамічну систему верстата може бути заміною рівнодіючою P , що дорівнює сумі сил, а зміна товщини шару, що зрізується, дорівнює відносному зсуву

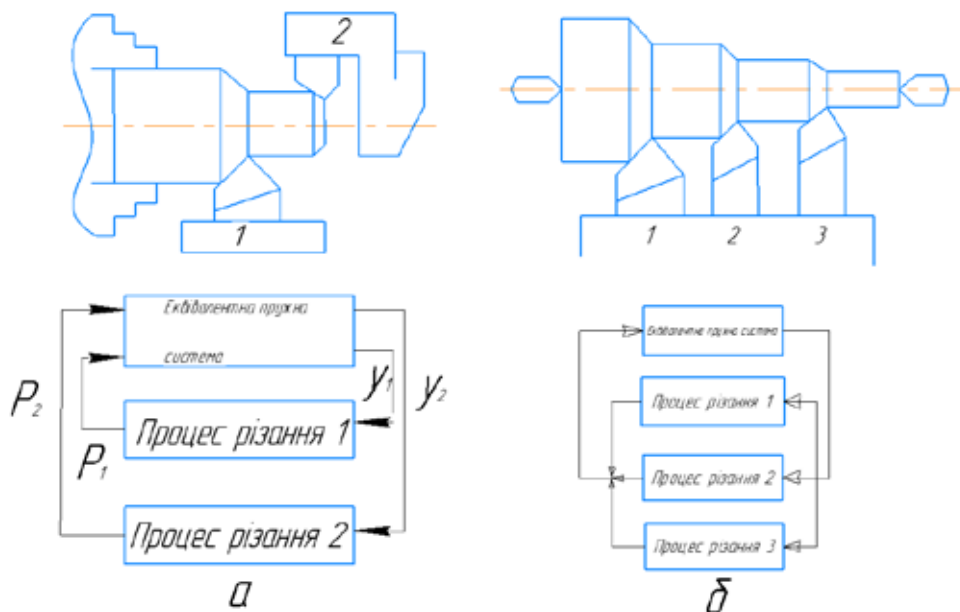


Рис. 1. Схеми динамічних систем верстата у разі багатолезового точіння

різцетримача і заготовки під дією сумарної сили різання. Воно є однаковим для всіх різців.

Установка двох різців, повернутих один відносно іншого на 180° , перпендикулярних до осі центрів верстата, на деяких режимах різання дозволяє підвищити сумарну глибину різання на 20–30%. У разі установки третього та четвертого різців стійкість системи в такому випадку не підвищується, але вібрації виникають на кожному з різців за будь-якого їх відносного положення. Це пояснюється зміною умов роботи пружної системи, за яких сили різання на кожен різець діють одночасно в різних напрямках, що і зумовлює нестабільність процесу різання.

У процесі виконання операцій на токарних верстатах, працюючи двома різцями, встановленими за першою схемою, можна підвищити вібростійкість верстата в кілька разів. До таких операцій належать: відрізання відрізним і прорізними різцями, нарізування трикутної різьби двома різцями, зміщеними один відносно іншого в напрямку подачі, прорізка торцевих канавок різної ширини.

Для порівняння однолезового і багатолезового точіння була визначена вібростійкість кожного різця окремо. Виявилось, що вона однакова у всіх різців. Вібростійкість оцінювалася за граничною глибиною різання, що становить 5 мм. Зі збільшенням кількості n одночасно працюючих різців неухильно зростає сумарна гранична глибина різання як у разі подачі 0,1 мм/об., так і у разі подачі 0,3 мм/об. Ця залежність майже нелінійна і може бути представлена в такому вигляді:

$$t_{\text{сум.пр}} = nt_{\text{сп}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{сп}}$ – гранична глибина різання, що припадає у середньому на один різець.

Зі збільшенням кількості різців величина $t_{\text{сп}}$ безперервно зменшується. Характер її зміни можна визначити, представивши дискретні значення граничної гли-

бини різання, одержувані у разі зміни кількості різців залежністю, яка описується рівнянням

$$t_{\text{сп}} = ak^n, \quad (2)$$

де a – деякий постійний коефіцієнт, k – коефіцієнт, що характеризує зміну середньої граничної глибини різання.

Зазначені особливості багаторізцевого точіння дозволили запропонувати кілька конструкцій різців підвищеної вібростійкості, головна ріжуча кромка яких складається з декількох окремих ріжучих елементів.

Ефективним засобом зменшення рівня вібрацій у системі є застосування багаторізцевої обробки. Поряд з усуненням вимушених коливань металорізальних верстатів шляхом використання різних засобів віброізоляції досить ефективним є застосування технологічних засобів гасіння вібрацій, що полягають у виборі раціональних режимів різання, визначенні ділянок вібростійкої обробки на верстатах, призначення оптимальної геометрії ріжучого інструменту, що підвищує вібростійкість, а також застосування різних пристроїв, що гасять вібрації.

Успішно використовуються для гасіння вібрацій різці різних конструкцій і геометрії, наприклад, пружинні, відрізні з двома ріжучими крайками, з віброгасильною фаскою, відрізні з подвійним заточуванням головного кута в плані. Під час точіння і розточування широко застосовують різні віброгасильні пристрої. Місце їх установки залежить від схеми обробки, наприклад, під час обробки деталі, консольно закріпленої в патроні, віброгасильний пристрій слід встановлювати на патроні або на шпинделі верстата, а під час обточування в центрах такі пристрої повинні контактувати безпосередньо із заготовкою.

Розточування борштангами, оснащеними декількома різцями, досить широко застосовується з метою підвищення точності і продуктивності обробки. При цьому різці можуть встановлюватися за принципом ділення глибини різання або подачі.

Установка різців за принципом поділу подачі проводиться для поєднання напівчистового і чистового розточування, причому напівчистовий різець випереджає чистовий на 1–2 мм уздовж осі борштанги.

Динамічні властивості розточувальних верстатів визначаються в основному властивостями шпіндельного вузла, який може бути представлений у вигляді двомасової пружної системи, де маса m_1 борштанги приведена до різця, а маса шпинделя з фланцями – до стику шпинделя з борштангою. Під час розточування одночасно двома різцями згинальні коливання системи в двох взаємно перпендикулярних напрямках, нормальних до осі оброблюваного отвору, описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} m_1 k_1 \ddot{y}_1 + m_2 k_{12} \ddot{y}_2 + r_1 k_1 \dot{y}_1 + r_2 k_{12} \dot{y}_2 + y_1 &= \\ &= k_1 (-P_{y1} - \cos \beta P_{y3} + \sin \beta P_{z3} - C_y) \\ m_2 k_2 \ddot{y}_2 + m_1 k_{12} \ddot{y}_1 + r_1 k_{12} \dot{y}_1 + r_2 k_2 \dot{y}_2 + y_2 &= \\ &= k_{12} (-P_{y1} - \cos \beta P_{y3} + \sin \beta P_{z3} - C_y) \\ m_1 k_1 \ddot{z}_1 + m_2 k_{12} \ddot{z}_2 + r_1 k_1 \dot{z}_1 + r_2 k_{12} \dot{z}_2 + z_1 &= \\ &= k_1 (P_{z1} + \cos \beta P_{z3} + \sin \beta P_{y3} + C_z) \\ m_2 k_2 \ddot{z}_2 + m_1 k_{12} \ddot{z}_1 + r_1 k_{12} \dot{z}_1 + r_2 k_2 \dot{z}_2 + z_2 &= \\ &= k_{12} (P_{z1} + \cos \beta P_{z3} + \sin \beta P_{y3} + C_z) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

де y_1 і z_1 – переміщення пружної системи у чистового різця відповідно в напрямках нормалі і дотичній до оброблюваної поверхні; y_2 і z_2 – переміщення пружної системи у фланця шпинделя в тих же напрямках; r_1 і r_2 – наведені коефіцієнти демпфування пружної системи у чистового різця і у фланця шпинделя; k_1 і k_2 – податливості пружної системи у чистового різця і у фланця шпинделя; k_{12} – переміщення борштанги у різця від одиничної сили, докладеної до фланця шпинделя; C_y і C_z – номінальні значення складників сил різання, що діють на чистовий різець (зовнішній вплив); P_{y1} і P_{z1} – зміни складників сили різання на чистовому різці; β – кут між різцями.

На підставі використання динамічної характеристики вільного різання (Kudinov, 1967) отримані диференціальні рівняння процесів різання:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{y1} + T_{y1} \dot{P}_{y1} &= \mu_1 K_{p1} U_1 \\ P_{z1} + T_{z1} \dot{P}_{z1} &= K_{p1} U_1 \\ P_{y3} + T_{y3} \dot{P}_{y3} &= \mu_3 K_{p3} U_3 \\ P_{z3} + T_{z3} \dot{P}_{z3} &= K_{p3} U_3 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де K_{p1} і K_{p3} – коефіцієнти різання відповідно для чистового і напівчистового різців; T_{y1} , T_{z1} , T_{y3} , T_{z3} – постійна часу стружкоутворення для зазначених складників сил різання; μ_1 і μ_3 – середні значення коефіцієнтів тертя стружки об передню поверхню чистового і напівчистового різців, $y_3 = y_1 \cos \beta - z_1 \sin \beta$ – переміщення пружної системи у напівчистового різця в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні.

Переважаюча низької частоти в коливаннях системи шпіндель-борштанга призводить до того, що зміна сили різання на напівчистовому різці надає демпфуючу дію в тому випадку, коли різці розташовані в одній площині.

Аналіз роботи консольного інструменту, в тому числі розточувальних борштанг, характеру його завантаженості і деформації, показує, що найкращим за вібростійкістю слід вважати інструмент, маса якого зменшується до можливого мінімуму на вільному кінці, а жорсткість або модуль пружності матеріалу збільшується до можливого максимуму у закріпленні (Kudinov, 1967).

Під час роботи на фрезерних верстатах можуть виникнути автоколивання, які є домінуючими у разі фрезерування; вимушені коливання, викликані конструктивними елементами верстата, а також коливання, які з'являються внаслідок змінного перетину стружки, неоднакового числа одночасно працюючих зубів фрези, змінного припуску, переривчастого різання, змінних кутів різання та інших факторів.

Автоколивання у системі розвиваються внаслідок того, що будь-які випадкові поштовхи, наприклад під час первинного врізання фрези, зриву наросту, зрізання нерівномірного припуску, виводять з рівноваги пружну систему і призводять до змін товщини зрізаного шару. У результаті відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу власні затухаючі коливання стають незатухаючими автоколиваннями. Енергія, яка підтримує їх, створюється за рахунок змінної синхронно, але зрушеною по фазі сили різання. При цьому на обробленій поверхні з'являються сліди вібрацій, які є додатковими джерелами енергії системи коливань, підсилюючими коливання. Поряд з цим зростають і сили демпфування, тому через деякий час настає рівновага між енергією збудження, що надходить у систему, і енергією, що розсіюється у коливаннях, встановлюється певний рівень автоколивань. Він не залишається строго постійним, а періодично змінюється внаслідок додаткового припливу енергії і демпфування у системі.

Для всіх реальних процесів різання багатолезовим інструментом практично не властива робота по чистому матеріалу, а завжди спостерігається робота по сліду, залишеному попереднім лезом на поверхні деталі. У разі фрезерування різних конструкційних матеріалів рівень інтенсивності коливань збільшується протягом перших чотирьох-п'яти оборотів інструменту. За цей час по поверхні різання встигає пройти більше 20 зубів фрези.

Якщо врахувати елемент запізнювання, то автоколивальний процес у разі фрезерування можна представити у вигляді механічної системи з одним ступенем свободи (Pashinin, Tchernishev, 2012; Li, 2011). Рух цієї системи описується диференціальним рівнянням

$$m \ddot{y}(t) + b \dot{y}(t) + cy(t) = F \left[\dot{y}(t - \Delta) \right], \quad (5)$$

де m – наведена еквівалентна маса, b – постійна демпфування, c – еквівалентна жорсткість системи, F – функція, що враховує опір зрізуваного шару, тертя стружки об інструмент і тертя інструменту об поверхню деталі, Δ – час запізнювання або час проходження зубом фрези одного кроку.

У разі введення безрозмірного часу $\tau = \omega t$, де ω – власна частота динамічної системи, рівняння (3) перетворюється:

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + \varepsilon \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = \varepsilon f \left[\frac{dy(\tau - \delta)}{d\tau} \right] \quad (6)$$

У цьому рівнянні $\varepsilon = b/m\omega$ – малий позитивний параметр, $\varepsilon f[dy(\tau - \delta)/d\tau]$ – функція опору, $\delta = \omega\Delta$ – безрозмірне запізнювання.

Для знаходження умов самозбудження автоколивань обмежимося лінійним наближенням рівняння (4):

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + \varepsilon \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = \varepsilon \left[a_0 + a_1 \frac{dy(\tau - \delta)}{d\tau} \right] \quad (7)$$

Перший доданок правої частини рівняння (7) описує лише початковий зсув $y_0 = \varepsilon a_0$, відповідний постійному віджиму, а другий створює диференційно-різностне рівняння

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} + \varepsilon \frac{dy(\tau)}{d\tau} + y(\tau) = \varepsilon a_1 \frac{dy(\tau - \delta)}{d\tau},$$

якому відповідає характеристичний квазіполіном

$$G(\lambda) = \lambda^2 + 1 + \varepsilon \lambda (1 - a_1 e^{-\delta \lambda}) = 0 \quad (8)$$

Процес різання буде стійким, якщо всі коріння квазіполінома (8) розташовані в лівій напівплощині. Якщо

ж деякі комплексні корені його знаходяться праворуч від осі ординат, то має місце самозбудження коливань в динамічній системі. Беручи до уваги, що $\delta = \omega\Delta = 3\pi D\omega/50vz$, де v – швидкість різання, D – діаметр фрези, z – кількість зубів, і використовуючи метод Д-розбиття, можна побудувати ділянки стійкого різання в просторі конструктивних і технологічних параметрів. Такі ділянки в площині двовимірних перетинів показані на рис. 2.

Під час різання фрезами діаметром 50 мм з числом зубів 12 у площині (ω, v) вони мають вигляд двох секторів (рис. 2, а). Аналогічний вид ділянки стійкого різання мають у площині (D, v) і в площині (D, z) , побудованих на рис. 2, б $(z = 12)$ і в, в $(v = 100 \text{ м/хв})$ для фрез з власною частотою коливань системи 350 Гц. Загальним для всіх цих двовимірних перетинів є наявність двох окремих зон. Одна з них значно ширша. На рис. 2, г зображені ділянки стійкої роботи в площині (v, z) для фрез діаметром 50 мм у разі власної частоти коливань динамічної системи 350 гц.

Усуненню вібрацій у разі фрезерування значною мірою сприяє раціональний вибір режимів різання, геометричних параметрів інструменту та інших технологічних факторів. Це можна пояснити так, що зі збільшенням глибини різання довжина зрізаного шару за прийнятих умов фрезерування збільшується в 2,5 раза, тоді як зі збільшенням ширини фрезерування вона збільшується лише в 1,2 раза. Аналогічний характер закономірностей

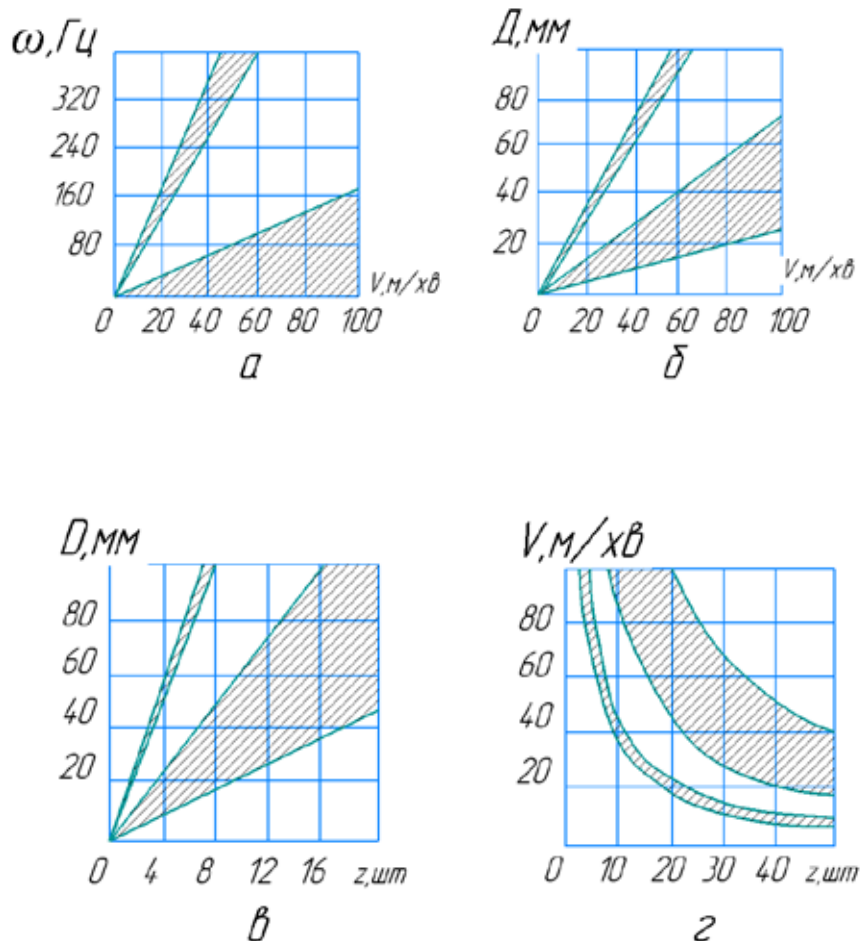


Рис. 2. Ділянки стійкого різання у разі фрезерування в просторі конструктивних і технологічних параметрів

зміни інтенсивності вібрацій від ширини фрезерування спостерігається для дискових і прорізних фрез.

Швидкість різання меншою мірою впливає на інтенсивність вібрацій, ніж параметри зрізу у разі фрезерування. Збільшення швидкості, як правило, призводить до деякого збільшення амплітуд коливань. Для процесу фрезерування зі збільшенням швидкості скорочується час повороту фрези на один зуб, а отже, частіше відбуваються врізання і виходи зубів з контакту з виробом, зростає енергія збудження, збільшується роль «сліду», залишеного на оброблюваній поверхні попереднім зубом.

Вплив зносу інструменту на інтенсивність вібрацій починає позначатися вже у разі появи невеликого, шириною 0,1–0,15 мм, майданчика зносу. Це пояснюється демпфуючою дією майданчика. У разі подальшого збільшення зносу до 0,2 мм амплітуда коливань зростає, тому для деяких типів фрез, що працюють за нерівномірного і переривчастого різання, доводиться за критерій затуплення приймати знос по задній грані, рівний 0,25–0,3 мм. Зниженню інтенсивності коливань під час фрезерування сприяє невелика циліндрична стрічка, прошліфрована по задній поверхні, а також віброгасильна фаска на ріжучих лезах фрези.

Збільшення числа зубів фрез у разі нерівномірного фрезерування призводить до збільшення амплітуд вібрацій, позаяк збільшується енергія збудження. Нерівномірне розташування зубів по колу зі зрушенням в 3–4° дає можливість знизити рівень вібрацій і на 10–20% збільшити стійкість інструменту.

Одним з основних факторів, що визначають рівень інтенсивності коливань, є жорсткість домінуючої коливальної системи. Зменшення жорсткості системи інструменту вдвічі призводить до збільшення амплітуди коливань у 3–5 разів. Тому сплави, що володіють високим ступенем демпфування, а отже, низькою жорсткістю, слід застосовувати не для виготовлення деталей системи інструменту, а для виготовлення віброгасильних і віброізолюючих елементів, таких як опори верстатів, станини, пружно-демпфуючі муфти, пружини для підвіски чутливих приладів, прокладки.

Для процесів свердління, зенкерування і розгортання характерні замкнута система діючих сил, складні умови транспортування стружки і подачі МОР у зону різання, протікання процесу різання в обмежених умовах, мала крутильна жорсткість інструменту. Під час глибокого свердління процес ускладнюється втратою стійкості стебла інструменту.

Характер коливальних процесів, що відбуваються під час обробки кінцевим мірним інструментом, залежить від його форми, числа і розташування ріжучих кромки, довжини інструменту і форми поперечного перерізу, що визначає його крутильну і поперечну жорсткість, режимів різання, оброблюваного матеріалу, виду МОР і цілого ряду інших факторів.

Врізання свердла в монолітний матеріал супроводжується інтенсивними коливаннями, зумовленими змінами положення свердла в процесі різання, зміною товщиною кірки на поверхні заготовки, негативним впливом

поперечної кромки. У разі зенкерування і розгортання етап врізання відбувається стабільніше.

Для опису коливань свердла приймають різні схеми коливальних систем. Вважають (Kudinov, 1967; Vigovskiy, 2008), що коливальною системою є система свердла, яка має один ступінь свободи в напрямку подачі, при цьому вважають, що осьова сила не залежить від швидкості. Розглядаючи випадок консервативної системи без урахування сил опору коливальному руху і враховуючи всі сили, що діють у напрямку подачі, можна записати диференціальне рівняння руху

$$m\ddot{x} + jx = P_x, \quad (9)$$

де m – приведена маса системи, j – її жорсткість, P_x – осьова сила.

Прийнята схема не враховує дії радіальних сил, які зумовлюють неминучі під час свердління поперечні коливання. Свердла в кінцевому підсумку визначають точність обробки і якість обробленої поверхні. Радіальні сили виникають внаслідок нерівномірного заточування ріжучих кромки свердла, неоднорідності оброблюваного матеріалу, нестабільності процесу врізання, дії поперечної кромки свердла.

Домінуючу коливальну систему свердла можна представити як коливальну систему з двома ступенями свободи (рис. 3, а). Оброблювана заготовка вважається абсолютно жорсткою, а свердло розглядається як матеріальна точка на осі свердла, що має масу m , підвішену на двох взаємно перпендикулярних пружинах. Поперечний переріз свердла, розташований біля затисненого кінця його, заштриховано, а перетин, розташований біля вершини свердла, не заштриховано. Радіальна пряма Y проходить через вісь свердла і його куточок, утворений перетином головної ріжучої кромки і стрічки.

Надлишкова радіальна сила P_p діє на свердло в постійному напрямку, яке становить з віссю Y кут β і залежить від співвідношення сил на головних і поперечній ріжучих кромках. Експериментально встановлено, що залежно від діаметра свердла, несиметричності його заточування і умов свердління величина надлишкової радіальної сили зазвичай змінюється від 50 до 200 Н.

Напрямки пружин системи, що відповідні напрямкам жорсткості свердла, позначені X_1 і X_2 . Кут між цими напрямками і віссю Y позначений α ($0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$), жорсткості пружин – відповідно K_1 і K_2 , а їх постійні заганання – C_1 і C_2 .

Свердління відбувається зі швидкістю v . Середнє положення свердла, відповідне стійкому різанню, визначається подачею S_1 на одну і S_2 на іншу ріжучі кромки (рис. 3, б). При цьому центр ваги системи знаходиться в точці O , а на свердло діє надмірна обертова сила P_p . У разі зміни положення свердла на величину $OO_1 = AA_1$ в деякому напрямку W становить з напрямком осі Y кут η , зменшується подача на одній з ріжучих кромки і збільшується на іншій на величину dS . З рис. 3, б видно, що $dS = yctg\varphi$,

де $AB = y = W\cos\eta$ – зміщення свердла в напрямку осі Y , φ – половина кута при вершині свердла. Надлишкова

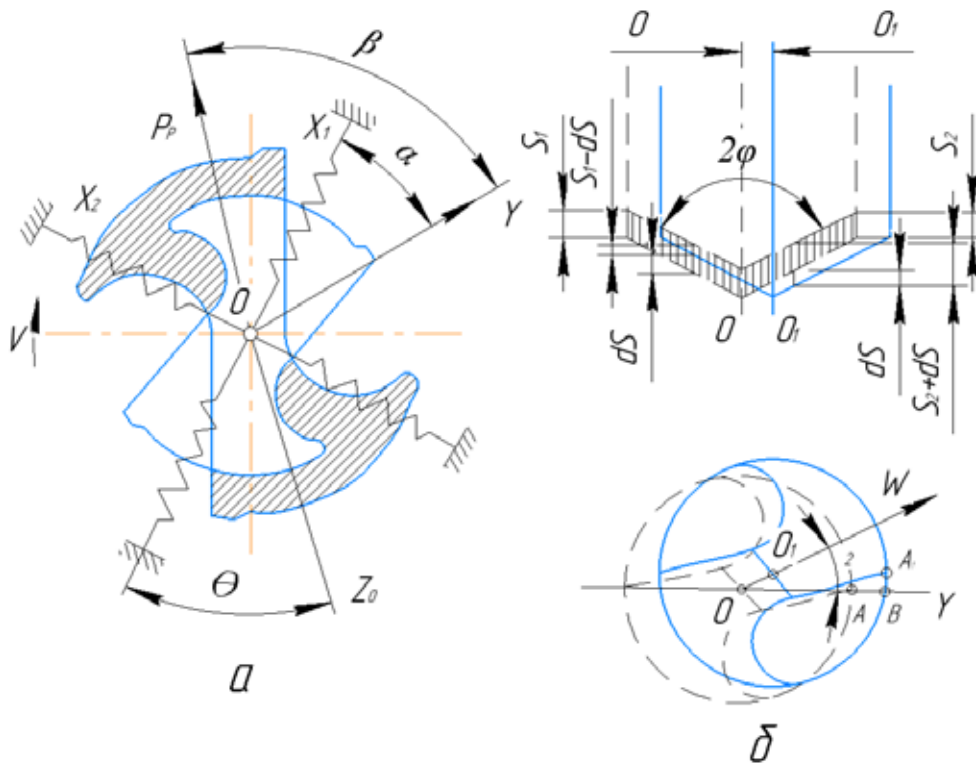


Рис. 3. Схема коливної системи свердла і схема зміни подач на ріжучій кромці у разі поперечних коливань

радіальна сила не постійна, змінюється на деяку величину ΔP_p , і тому результуюча радіальна сила

$$R = P_p \pm P_p.$$

Зміна сили пропорційна величині деформації: $\Delta P_p = \pm ry$. Тоді $R = P_p \pm ry$, де r – коефіцієнт пропорційності, що характеризує вплив різного поєднання режимів різання. З рис. 3, а видно, що $y = x_1 \cos \alpha - x_2 \sin \alpha$.

Виключаючи з розгляду постійну силу P_p як таку, що не впливає на коливання системи, рівняння руху для напрямків X_1 і X_2 можна записати у вигляді :

$$\begin{cases} M \frac{d^2 x_1}{dt^2} + C_1 \frac{dx_1}{dt} + [K_1 + r \cos \alpha \cos(\beta - \alpha)] x_1 - r \sin \alpha \cos(\beta - \alpha) x_2 = 0 \\ M \frac{d^2 x_2}{dt^2} + C_2 \frac{dx_2}{dt} + [K_2 - r \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)] x_2 + r \cos \alpha \cos(\beta - \alpha) x_1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

З цих рівнянь, враховуючи дані досліджень (Kudinov, 1967; Zhu, 2015), для випадку системи з дуже малими відносними загасаннями, що прагнуть до нуля, можна отримати рівняння межі стійкості:

$$\begin{cases} K_{r1} = \frac{1}{d-1} \left[\cos(2\alpha - \beta) \pm \sqrt{\sin 2\alpha \sin 2(\beta - \alpha)} \frac{1 + \sqrt{d}}{2\sqrt[3]{d}} \right] \\ K_{r2} = \frac{1}{d-1} \left[\cos(2\alpha - \beta) \pm \sqrt{\sin 2\alpha \sin 2(\beta - \alpha)} \frac{1 + \sqrt{d}}{2\sqrt[3]{d}} \right] \end{cases} \quad (11)$$

де $K_{r1} = K_1 / r$; $K_{r2} = K_2 / r$ – відношення коефіцієнта жорсткості до коефіцієнта впливу режиму різання, $d = K_{r1} / K_{r2}$ – відношення відносної жорсткості пружини в напрямку X_1 до відносної жорсткості пружини в напрямку X_2 .

Під час роботи з постійним режимом різання ($r = \text{const}$) величина d характеризує вплив жорсткостей пружин на коливальну систему, а в разі роботи зі змінним режимом різання ($r \neq \text{const}$) у заданій коливальній системі ($K_1 = \text{const}$ і $K_2 = \text{const}$) параметр d характеризує вплив режиму різання на коливальну систему.

Аналіз рівнянь (11) показує, що в загальному випадку є дві межі стійкості, що визначаються значеннями

$$(K_{r1\text{дон}}, K_{r2\text{дон}}) \text{ і } (K_{r1\text{дон}}, K_{r2\text{дон}}) \quad (12)$$

Нестійка робота може мати місце тільки у системі, що задовольняє нерівності $0 < \alpha < \beta$. Значна нестійкість виникає тільки при $\alpha > 1$, тобто в разі використання пружини меншої жорсткості. У разі заданої жорсткості пружин і $\alpha = 0,5\beta$ нестійкість процесу виникає за найбільш низьких значень коефіцієнта впливу режимів різання r .

Вібростійкість системи підвищується із застосуванням свердел з чотирма кромками, які, на відміну від стандартних, мають чотири напрямних стрічки і сердцевину збільшеного діаметра. Великі порівняно зі звичайними моменти інерції у таких свердел визначають їх більш високу жорсткість і менші деформації під час свердління. Максимальні кути закручування цих свердел приблизно в 2–2,5 раза менші, ніж стандартні. Швидкісне свердління глибоких отворів неминуче супроводжується вимушеними коливаннями, що відбуваються з частотою, що дорівнює числу оборотів виробу.

Виникнення коливань у разі глибокого свердління пояснюється різною твердістю окремих ділянок заготовки в такому поперечному перерізі, базуванням інструменту

на оброблений ним же отвір, що володіє деякою кривизною, похибкою заточування ріжучих кромки інструменту і нерівномірністю їх зносу.

Стебло свердла втрачає стійкість за деякого значення осової сили. Критичне навантаження для стебла свердла

$$P_{кр} = \frac{\eta EJ}{l^2} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2},$$

де η – коефіцієнт стійкості, μ – коефіцієнт наведеної довжини, l – довжина свердла, E – модуль пружності, J – момент інерції перетину стебла свердла.

Коефіцієнти η і μ визначають характер закріплення, вид навантаження, зміна перетину стебла по його довжині. Очевидно, $\eta = \left(\frac{\pi}{\mu}\right)^2$. Критичне навантаження

залежить від коефіцієнта приведення довжини і зростає у разі його збільшення.

Вібрації, що виникають у разі зенкерування, знижують стійкість ріжучого інструменту, якість обробки і призводять до руйнування лез твердосплавних зенкерів. Основною причиною вібрацій у разі зенкерування і розвертання є наявність слідів від попередньої обробки на поверхні оброблюваного отвору. При цьому фактична глибина різання буде нерівномірною і періодично змінюється. Внаслідок цього в динамічній системі, крім вимушених коливань, розвиваються інтенсивні автоколивання, частота яких близька до частоти вільних коливань одного з елементів системи і залежить від кроку хвилястості на поверхні. Автоколивання можуть бути настільки інтенсивними, що подальша обробка стає неможливою.

Тому підвищення продуктивності і якості обробки тісно пов'язане із забезпеченням вібростійкого різання.

Дослідження вібрацій багатолезового інструменту натеper використовуються провідними фірмами з виробництва сучасного інструменту зі змінними ріжучими пластинами Sandvik Coromant, Coro Bore та іншими (How to reduce vibration in milling. Sandvik Coromant, 2018). При цьому створюються системи так званого «тихого інструменту» (Silent Tools), в конструкціях яких передбачені спеціальні оправки з пристроями, що гасять вібрації. На жаль, проблема вібрацій нікуди не зникає і під час обробки на верстатах з ЧПУ (Kak izbezgat vibratciyu na stanke HAAS. Abamet. Ru, 2021).

Тільки у разі програмування верстатів передбачається стабільна робота в конкретних ділянках режимів різання.

Висновки. Таким чином, доведено, що зі збільшенням ріжучих кромки, що одночасно беруть участь у різанні, підвищується вібростійкість багатолезового інструменту за рахунок демпфуючих властивостей контактних зон ріжучих кромки та деталі. Це стосується токарних, розточних, фрезерних, свердильних та інших операцій. Коливання, що виникають, впливають на конструктивні особливості багатолезового інструменту. При цьому головною рекомендацією є не тільки підвищення жорсткості вузлів верстата, але й зміна конструкції ріжучого інструменту. Позбавитись динамічних коливань можна, головним чином, шляхом правильного вибору режимів різання, тобто знаходженням ділянок режимів, що забезпечують стабільну роботу багатолезового інструменту.

Бібліографічні посилання:

1. Astashev, V.K., Korendjasev, G.K., Erofeev, V.I. Termomekhanitceskaja model vozbuзgdenija avtokolebanij pri obrabotke metalov rezaniem [Thermomechanical model excitation of self-oscillations in metal cutting]. *Vesnik Nizhegorodskogo universyteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2013, Vip. 1(3), s. 29–35 (in Russian).
2. Vigovskiy, G.M., ta inshi. Doslidzennja vibratcii pri rizanni stali kombinovanim instrumentom [Investigation of vibrations when cutting steel with a combined tool]. *Visnik Sum'skogo derzgovnogo universitetu*, 2008, № 2 (in Ukrainian).
3. Kak izbezgat vibratcii na stanke HAAS [How to avoid vibrations on the machine HAAS], Abamet. Ru. 2021 (in Russian).
4. Kudinov, V.A. Dinamika Stankov [Machine tool dynamics]. Moskva, Mashinostroenie, 1967, 359 s. (in Russian).
5. Pashinin, A.V., Tchernishev E.A. Analiz pritchin pojavlenija vibrancij pri frezerovanii flantzev korpusov [Analysis of the causes of vibration when milling the flanges of the hulls], *Nauchnij vestnik DGMA*, 2012, Vip. 2 (in Russian).
6. Tchernishev, E.A. Razvitie predstavlenij o vibrancijakh pri rezanii [Development of ideas about vibrations during cutting]. *Nauchnij vestnik DGMA*, 2010, Vip.1. (in Russian).
7. How to reduce vibration in milling. Sandvik Coromant, 2018. URL: <https://www.sandvik.com>.
8. Li, K.S. Analysis on affecting factors of vibration in milling. *J. Liaoning Tech. Univ.*, 2011, 30: 884–887.
9. Peterson Linus. Vibration in Metal Cutting. Ronneby, Sweden. 2002, 101 p.
10. Zhu, H.B. Influencing factors of milling vibration based on cutting parameters and tool wear. *Mech. Res. Appl.* 2015, 28: 57–59.

Pukhovskyy Ye. S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ELIMINATION OF VIBRATIONS DURING MULTI-BLADE PROCESSING

It is difficult to achieve high quality when processing on machines due to vibrations that reduce the productivity and accuracy of processing, reliability and durability of machine tools, as well as the stability of the cutting tool. The phenomenon of vibrations is most fully theoretically and experimentally investigated at single-cut sharpening on lathes. The published works (Astashev, Korendjasev, Erofeev, 2013; Tchernishev, 2010; Kudinov, 1967; Pashinin, Tchernishev, 2012; Peterson, 2002) do not pay enough attention to the issue of elimination of vibrations in the processing of metals using multi-blade tools: drills, scans, zenkers, spans, cutter, threaded and other tools. The result of studies of vibrations during multi-blade processing is not systematized, they do not pay enough attention to the effects of vibrations on the performance of makofiyuts' makofiers, stability of cutting tools and quality indicators of parts – accuracy, roughness and properties of surface layers of parts. Such data is especially important in connection with the use of CNC machines operating with a multi-blade tool.

When drawing up programs for these machines, restrictions on cutting modes that are imposed due to the possibility of vibration should be taken into account. When using multi-blade cutting, the dynamic machine system becomes more complex, which requires additional research to establish areas of vibration-free processing modes, which guarantees the quality of the parts. The novelty of the work consists in a comprehensive study of the effect of vibrations on the work of complex tools: cutter, drill, tensioners, zenkers, scans and threaded heads. This allows you to develop recommendations for the sustainable operation of the tool in the conditions of its use in modern machine systems with CNC equipment. The article summarizes the issues related to vibrations in multi-blade processing, considered technological factors affecting the intensity of vibrations. Particular attention is paid to technological methods of vibration elimination during multi-blade processing by choosing rational cutting modes, optimal design and sharpening of multi-blade tools, as well as through the use of various vibration-absorbing devices. The basis for writing the article is the author's developments related to vibra-resistant multi-blade finishes, as well as developments made by other domestic and foreign experts (Kudinov, 1967; Tchernishev, 2010; Li, 2011; Zhu, 2015).

Key words: vibrations, oscillations, dynamic system, accuracy, processing quality.

Дата надходження до редакції: 24.11.2021 р.

IMPROVEMENT OF DUST COLLECTORS FOR IMPLEMENTATION IN THE FOOD INDUSTRY

Savchenko-Pererva Marina Yuryevna

PhD, Associate Professor

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0002-8498-3272

marina.saw4encko2011@gmail.com

Radchuk Oleg Vladimirovich

PhD, Associate Professor

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0002-8228-2499

ovradchuk@gmail.com

This paper presents a study of the processes occurring in apparatus with counter-swirling flows and proposes a mathematical model for calculating the fractional and overall efficiency of the devices. An experimental stand was used to investigate a typical design and an advanced apparatus with counter-swirling flows. For determination of the overall efficiency, the samples were examined on a disperse composition using a scanning electron microscope with a low vacuum camera SEM-106 I and a ribbon with sprayed silver in the vacuum universal post VUP-5M. The disadvantage of the typical design of the improved apparatus with counter-swirling flows (ACSF) is the reduced rotational motion of the primary flow, which slows down the separation process and leads to a decrease in the fractional efficiency of cleaning of medium and small fractions of the dusty product from the air. The inhibitory effect is due to the small input momentum of motion in the primary flow compared to the momentum of motion in the secondary flow. One way to increase the rotational motion of the primary stream may be to double M_{input1} , according to the law of conservation of momentum, due to geometric changes in the lower cylindrical part of the apparatus. That is, it is necessary to increase the diameter of the lower part of the ACSF, in order to increase the momentum in the primary flow of the axial swirler. In this case, the ratio of flow rates of air and impulses will be offset and the braking effect will be eliminated. Thanks to the developed mathematical model, it is seen that with increasing the momentum of motion in the primary flow of the axial swirler increases the efficiency of trapping fine particles of sawtooth product in the external and internal layers of the separation chamber of the improved ACSF. This has the effect of improving overall performance overall. After preparing the samples for analysis and examining them on a raster microscope, we obtained images of the dispersed composition of the product, which calculated the number of particles of a certain diameter, and then calculated them in percentage to the total number of particles in one sample, so that we obtained efficiency for each fraction of particles. Namely, the smallest fraction of particles captured was 1.99 microns of advanced ACSF, the typical design of the ACSF is 2.55 microns. Due to the developed mathematical model of the momentum of motion for the primary swirler, an improved design of the ACSF was created.

Key words: dust collector, flow rates, improvement, efficiency, capture, momentum.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.7>

Introduction

The development of large cities, accompanied by the development of industry, increasingly leads to the pollution of residential areas with industrial gases (Azarov et al., 2017; Azarov et al., 2019). The content of harmful substances in the air significantly exceeds hygiene standards. Obviously, the current situation can be improved through the use of modern, more advanced technologies (Azarov et al., 2020; Azarov et al., 2016). It is important to increase the efficiency of systems for cleaning the city from pollution and industrial emissions (Azarov et al., 2017; Bakaeva & Chernyaeva, 2017). Assessment of the dust environment at industrial enterprises, as a rule, is understood as the study of air in working areas, the power of dust emissions into the atmosphere, as well as the efficiency of dust cleaning devices (Besarion Meskhi et al., 2021; Kalyuzhina, 2013). In papers (Bogomolov et al., 2016; Evtushenko et al., 2020) the research process is presented, identifying bottlenecks, which are characterized by dustiness, analysis of existing dust removal systems, their efficiency, performance and

features of work in various environments. The articles (Bogomolov et al., 2016; Evtushenko et al., 2020; Klimenti et al., 2019) carried out comparative studies of the characteristics of silica clay dust, calcium silicate and chalk production in three intake zones for three types of dust collectors used in dust removal systems: fabric filters, cyclones and apparatus with counter-swirling flows (ACSF). Based on the measurement results, it was concluded that the dust from the dust collectors for all variants of dust collectors has a similar elemental composition and can be returned to the production process. The articles consider several more examples of the impact of industrial dust on the environment, as well as ways to reduce the technogenic impact on the environment (Kuzmichev & Loboyko, 2016; Kondratenko, 2021; Kondratenko et al., 2019; Kondratenko, 2020; Kondratenko & Lapina, 2020). The articles provide samples of dust-collecting equipment that can contribute to the task, however, all models of dust collectors do not give 100% cleaning efficiency (Kuzmichev et al., 2017; Koshkarev et al., 2019).

In addition to the chemical and construction industries (Protodiakonov & Chesnokov, 1987), purification of polluted air from dust is also necessary in food production. With the help of dust collectors, dusty gas is separated into dust and purified air (Sergina et al., 2019; Sergina et al., 2017). Dust collecting equipment is used in food production to eliminate losses in the production of products that pollinate the air (salt, milk powder, food concentrates, sugar), as well as to reduce environmental pollution (Savchenko-Pererva & Yakuba, 2015; Sabadash et al., 2015). At the enterprises of the food industry, most of the production processes are accompanied by the release of dust. This reduces the safety of production, and is also an urgent problem both from an environmental and economic point of view. The problem of reducing losses during drying is of great economic importance. The value of the removal of the product with the exhaust air into the atmosphere due to the imperfection of cleaning methods and equipment reaches large volumes. Depending on the aerodynamic characteristics of the drying tower and cyclones, the speed of movement of the drying agent, product particles in the air entering the cyclone, the physicochemical properties of the product and its particle size distribution can be significant. The main disadvantage is the comparatively small fractional efficiency of this apparatus when capturing dust up to 5–10 microns in size (Vasiliev et al., 2019; Zhukova et al., 2016; Zhukova et al., 2017).

Recently, the world has been increasingly focusing on foods that have a long shelf life and high transport characteristics. Such requirements are achieved by the use of food drying technologies, which require the development of energy efficient and productive equipment that is directly related to the production of finished products, and auxiliary – dust, because first – it is expensive, and second – no 100% output of pure product (Azarov et al., 2019; Piralishvili & Kudryavtsev, 1992).

Dusting is a responsible operation, the output of the finished product at the end depends on the efficiency of the separation of the dispersed particles in the gas. Cyclones have the highest prevalence in processing plants. These devices are simple to manufacture and operate and provide trapping of particles up to 10 μm . The main disadvantage of these devices is their overall size and limited performance. Therefore, it is advisable for processing plants to use apparatus with counter-swirling flows (ACSF), which have the ability to control the process of separation of gas and liquid inhomogeneous mixtures. The field of study of the processes that take place in the ACSF is poorly understood. Their use in production allows you to increase productivity, reduce the size, material consumption of the structure and optimize the processes that take place in them (Savchenko-Pererva et al., 2016).

Materials and methods

Materials and equipment that were used in the experiments to determine efficiency were investigated.

At the Sumy National Agrarian University, an experimental stand was installed in the laboratory № 111m to investigate a typical design and an advanced apparatus with counter-swirling flows (Fig. 1).

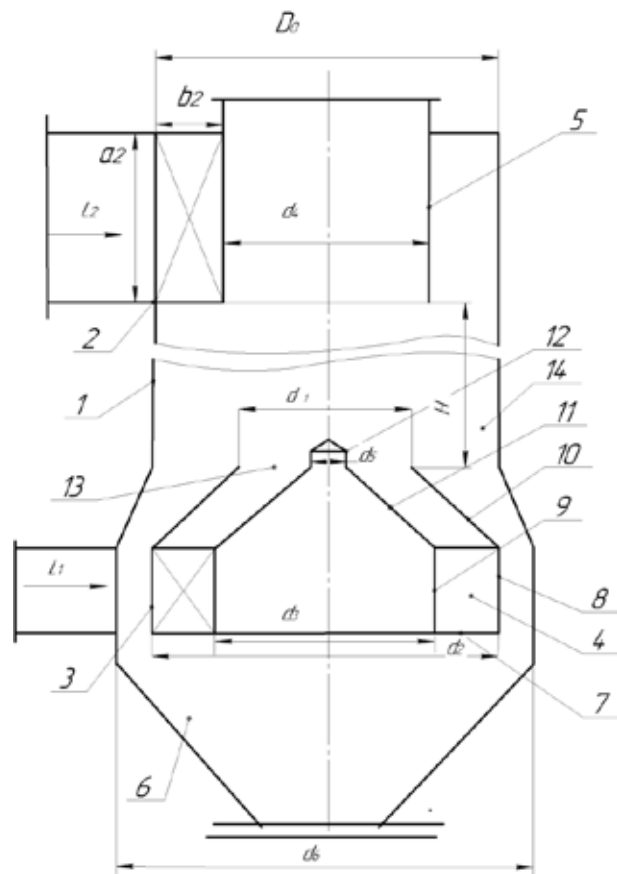


Figure 1. Scheme of the general view of the improved ACSF (with two cones): 1 – case; 2 – tangential input of the external (secondary) flow; 3 – axial lower (primary) arrangement; 4 – swirler of the primary flow; 5 – outlet pipe; 6 – conical hopper; 7 – flat washer bottom; 8 – outer shell; 9 – internal shell; 10, 11 – conical shells; 12 – flow suppressor; 13 – the outlet opening of the primary flow; 14 – hole between the washer and the dust collector case

The stand consists of the apparatus (1), depending on the tested ACSF, the lower cylindrical part was changed, the dust collector (2) into which the dusty product being trapped (as a powdered product used milk powder), artificial air dusting systems (3), flexible air duct (4), air flow regulator (5), high-pressure fan No. 3 – impeller on the shaft of the bearing assembly, which is connected to the electric motor by cogwheel transmission, and which allows to change the rotation of the impeller by pulleys (6) and system pulverization and analysis of experiments (7).

All studies were repeated 5 times with a discrepancy of results of no more than 5%.

To determine overall performance, a typical ACSF design and an advanced ACSF design were used. Samples obtained from an advanced ACSF and model design were investigated for dispersion using a scanning electron microscope with a low vacuum camera SEM-106 I. The studies used tapes that had been pre-filled with silver at the Institute of Applied Physics using VUP –5M (vacuum universal post), after which they were transferred to a SEM-106 I sample holder pre-greased with a carbohydrate paste.

Results

Existing vortex dust collector (typical design) includes a case, an exhaust pipe, for the purification of purified air, two-channel suction air inlet nozzle, primary through the lower axial vortex, and a secondary, main air flow through a tangential or flywheel device. A deflector washer is located between the case and the lower vortex, to allow the dust product to be lowered into the hopper and to prevent its removal with clean air (Protodiakonov & Chesnokov, 1987).

The disadvantage of the typical design is the reduced rotational motion of the primary flow, which inhibits the process of separation and leads to a decrease in the fractional efficiency of cleaning the middle and small fractions of the dusty product from the air.

The rotational motion depends on the angular flow velocity, which is determined by equation:

$$\omega_0 = \frac{2M_{enter}}{\rho_{air} \cdot L_3 \cdot r_4^2}, \quad (3)$$

where M_{enter} – momentum of motion (moment of amount of motion), (N·m); ρ_{air} – density of dusty air, (kg / m³); L_3 – total flow of air flows, (m³ / s); r_4 – radius of the exhaust pipe of the dust collector, (m).

The inhibitory effect is due to the small input momentum of motion in the primary flow compared to the momentum of motion in the secondary flow. Thus, in a typical ACSF (Fig. 3), the lower vortex is twice less than the upper one and at the flow rates of air $L_{enter2} : L_{enter1} = 2 : 1$ and the momentum of motion is $M_{enter2} : M_{enter1} = 4 : 1$. One way to increase the rotational motion of the primary stream may be to double M_{enter1} , according to the law of conservation of momentum, due to geometric changes in the lower cylindrical part of the apparatus. In this case, the ratio of flow rates of air and momentums will be offset and the braking effect will be eliminated.

In general, the momentum of motion at the entrance to the ACSF is calculated by the equation:

$$M_{enter} = m \cdot V_T \cdot r_0, \quad (4)$$

where m – body weight or air, kg; V_T – tangential velocity, m / s; r_0 – radius of entrance, m.

Fractional efficiency in internal and external layers

After some transformations (Savchenko–Pererva et al., 2016) found:

– the efficiency equation in the external layer:

$$\eta_{average2} = d^2 \cdot \frac{\pi \cdot H \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_T \cdot r_*^4 \cdot (r_0 + r_*) \cdot (2,36(r_{average}^2 - r_0^2) + L_1 \cdot (r_0^2 - r_{average}^2))}{9\mu \cdot L_1 L_2 \cdot (r_0 + r_{average}) \cdot (r_{average}^2 - r_0^2)}. \quad (5)$$

where ω_0 – angular velocity of flow 1 / s; L_1, L_2 – loss of flows in primary and secondary channels m³ / hour; r_* – radius border split streams (a constant), m; r_0 – the radius of the dust collector case (constant) m; $r_{average}$ – average radius of the flow (constant for each apparatus), m; H – height of the separation zone of the apparatus, m; μ – coefficient of dynamic viscosity of air, PA·s; ρ_T – density solid particles of milk powder, kg / m³.

– the efficiency equation in the internal layer:

$$\eta_{average1} = d^2 \frac{\omega_0^2 \cdot \pi \cdot \rho_T \cdot r_*^5 \cdot H (2,36 + L_1 \cdot (r_* - r_{average}))}{9\mu \cdot L_1 L_2} \quad (6)$$

The theoretical overall efficiency

The overall efficiency ACSF after improvement will be calculated by the formula:

$$\eta_{overall} = \sum \frac{\eta_2 \cdot f}{100} \cdot \frac{L_2}{L_3} + \sum \frac{\eta_1 \cdot f}{100} \cdot \frac{L_1}{L_3} \cdot \frac{\eta_{i2}}{100}, \quad (7)$$

where f – quantitative percentage ratio of dispersed particle size (Table 1).

The results of the studied samples from the improved ACSF and a typical design, which were examined for dispersion using a scanning electron microscope with a low-vacuum chamber SEM–106 I, are shown in the table 2.

Discussion

Using the obtained equations of theoretical total and fractional efficiency in the internal and external layers of cylindrical apparatus with counter-swirling flows, in the subsequent experiments it will be possible to take into account the influence of system parameters, which will allow to evaluate the ability of the devices to effectively capture the pulverized material.

Thanks to the mathematical model developed in equation (7), it is seen that by increasing the momentum of motion in the primary flow of the axial swirler, the efficiency of trapping of fine particles of the sawtooth product in the external and internal layers of the separation chamber of the ACSF is increased. This is to improve overall performance overall. In the advanced ACSF, the overall efficiency of capturing milk powder was $\eta_2 = 99,6\%$, in the typical design – $\eta_1 = 94,4\%$.

After preparing the samples for analysis and examining them on a scanning electron microscope, they obtained images of the dispersed composition of the product, which calculated the number of particles of a

Table 1

Dispersion of particles of powdered milk

d, m	5.1	8.2	10.5	20.8	32.5	41.6	55.1	60
f %	1.15	6.3	14.8	17.3	23.7	12.4	12.4	9.15

Table 2

Disperse composition of experimental samples of milk powder

Type ACSF	Number particulate, n	The average diameter of particles $d_{average}$, m	The smallest diameter solids d_s , m	The largest diameter solids d_l , m
Typical	89	31.13	2.55	142.00
After improvement	99	25.59	1.99	135.51

certain diameter, and then calculated them in percentage to the total number of particles in one sample, so that we obtained efficiency for each fraction of particles. Namely, the smallest fraction of particles captured was 1.99 microns of advanced ACSF, the typical design of the ACSF is 2.55 microns.

Conclusions

Due to the developed impulse equation for the primary swirler, an improved design of the ACSF was created, which

was then conducted and then experimental studies were conducted. The samples obtained were compared with those made on a typical construction. The obtained results of efficiency confirm the correct method of increasing the diameter of the lower part of the ACSF, in order to increase the moment of the amount of movement in the primary flow of the axial swirler. In the advanced ACSF, the overall efficiency of capturing milk powder was $\eta_2 = 99,6\%$, in the typical design – $\eta_1 = 94,4\%$.

References:

1. Azarov, V.N., Sergina, N.M. & Kondratenko, T.O. (2017). Problems of protecting urban air from pollution by industrial dust emissions. *MATEC Web of Conferences* (Vol.106, № 6, p. 07017). doi.org/10.1051/mateconf/201710607017
2. Azarov, V.N., Dobrinskiy, D., Lupinogin, V. & Sakharova, A. (2019). Determination methodology of the subsidence speed of small-dispersed particles of different ranges of storage facilities by visual recording. *E3S Web of Conferences* (Vol.126, № 1, p. 00072). doi.org/10.1051/e3sconf/201912600072
3. Azarov, V.N., Sergina, N.M., Majd Ostali, Sakharova, A.A. & Kopeikina, A.A. (2019). On some features of the layout of dust cleaning systems with vortex inertial devices with counter swirling flows. *Engineering Bulletin of the Don*, 1 (6).
4. Azarov, V.N., Kuzmichev, A.A., Nikolenko, D.A., Vasilev, A.N. & Kozlovtsseva, E.Y. (2020). Issledovanie dispersnogo sostava pyli gorodskoj srede [The research of dust dispersed composition of urban environment]. *Ezhemesjachnyj zhurnal po stroitel'stvu i arhitekture*, 15(3), 432–442 (in Russian). DOI:10.22227/1997-0935.2020.3.432-442
5. Azarov, V.N., Barikaeva, N. & Solovyeva, T. (2016). Monitoring of Fine Particulate Air Pollution as a Factor in Urban Planning Decisions. *Procedia Engineering*, 150, 2001–2007. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.279
6. Azarov, A.V., Zhukova, N.S. & Antonov F.G. (2017). Water-spray systems reducing negative effects of fine-dispersion dust at operator's workplaces of machine-building industries. *International Conference on Industrial Engineering, Procedia Engineering* (Vol. 206, pp. 1407–1414). DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.653
7. Bakaeva, N.V., & Chernyaeva, I.V. (2017). Criterion for estimation of ecological safety of objects of urban transport construction. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 262, No. 1, p. 012192). IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/262/1/012192
8. Besarion Meskhi, Evtushenko, A., Azarov, V. & Zhukova, N. (2021). Comprehensive assessment of the dust environment at the construction industry enterprises. *E3S Web of Conferences* (Vol. 281, № 5, p. 09024) doi.org/10.1051/e3sconf/202128109024
9. Bogomolov, A., Sergina, N. & Kondratenko, T. (2016). On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areas in the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF. *Procedia Engineering*, 150, 2036–2041. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.290.
10. Bogomolov, A. N., Zhukova, N. S., Azarov, D. V., & Khagai, D. S. (2016). Ocenka pylevogo faktora v vozduhe rabochej zony na predpriyatijah po proizvodstvu mela [Assessment of dust factor in air of the working zone at the enterprises of chalk production]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Serija: Grazhdanskoe stroitel'stvo i arhitektura*, 43(62), 175–188 (in Russian).
11. Evtushenko, A.I., Sakharova, A.A., Kharlamov, V.O. & Azarov, V.N. (2020). The study of the silica clay dust elemental composition in building materials' production. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* (Vol. 913, № 3, pp.032047). DOI: 10.1088/1757-899X/913/3/032047
12. Kuzmichev, A.A. & Loboyko, V.F. (2016). Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning. *Procedia Engineering*, 150, 2095–2101. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.244
13. Kondratenko, T.O. (2021). Solutions to reduce dust emissions mass into urban air in aerated concrete production. *E3S Web of Conferences* (Vol.281, p. 09012). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128109012
14. Kondratenko, T.O., Danilova-Volkovskaya, G.M., Fursov, V.A. & Kobalia, T.L. (2019). The basic properties study of the dust particles entering the localization system and emissions cleaning in the aerated concrete production and building gas concrete blocks. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 698, p. 022075). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/698/2/022075
15. Kondratenko, T.O. (2020). Experimental studies to develop the measures for reducing dust emissions mass into the atmosphere from the sources of the aerated concrete structures shop. *Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol.913, p. 052047). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/913/5/052047
16. Kondratenko, T.O. & Lapina, A.P. (2020). Assessment of the concentration and properties of dust in emissions into atmospheric air from the sources of the workshop for the aerated concrete structures production. *Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol.1083, pp. 01208–12020). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/1083/1/012081
17. Kalyuzhina, E.A., Kireyeva, A.I., Marinin, N.A., Gladkov, E.V., & Mikhailovskaya Yu.S. (2013). Ob approksimacii integral'nyh funkcij dispersnogo sostava pyli v vozdušnoy srede. [About approximation of integrated functions of disperse structure of a dust in the air environment]. *Alternativnaja jenergetika i jekologija*, 14(136), 52–56 (in Russian).
18. Kuzmichev, A.A., Azarov, V.N., & Kuzmichev, A.V. (2017). The research of contamination regularities of historical buildings and architectural monuments by methods of computer modeling. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 129, p. 05002). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905002
19. Koshkarev, S.A., Stefanenko, I.V., & Koshkarev, K.S. (2019). Complex dispersed analysis of particles applying in output hydrodynamic criteria decreasing dust leakage through collectors of aspiration in construction industry. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 687, No. 6, p. 066074). IOP Publishing.

20. Klimenti, N.Yu., Khorzova, L.I., Azarov, D.V. & Vlasova O.S. (2019). Experimental investigation of aerodynamic properties of colour pigment for calcium silicate bricks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 315, № 6, p. 062007). IOP Publishing.
21. Protodiakonov, Y.O. & Chesnokov, Yu.G. (1987). *Gidromekhanicheskie osnovy himiko-tehnologicheskikh processov* [Hydromechanical foundations of chemical technology processes]. *Uchebnyk dlja vuzov. L.: Himija*, 360 p. (in Russian).
22. Piralishvili, Sh.A. & Kudryavtsev, V.M. (1992). Issledovanie haraktera raspredelenija osrednennyh parametrov zakruchennogo potoka po obemu kamery vihretrubnogo jenergoseparatora s dopolnitel'nym potokom [Investigation of the nature of the distribution of the averaged parameters of the swirling flow over the chamber volume of the vortex tube energy separator with an additional flow]. *IFZh*, 62(4), 534–538 (in Russian).
23. Sergina, N.M., Sakharova, A.A., Azarov, V.N., Azarov, D.V. & Nikolenko, M.A. (2019). Dust emissions' reduction into the atmosphere by environmental–engineering systems of smallsize devices with counter–swirling flows (CSF). *Web of Conferences* (Vol.138, p. 01037). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801037>
24. Sergina, N.M., Kondratenko, T.O., Nikolenko, M.A. & Pushenko, S.L. (2017). Principles of layout and assessment of the systems effectiveness to protect against dust pollution of air in the working area and atmospheric air. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport* (Vol. 692, pp. 710–719). DOI:10.1007/978-3-319-70987-1_75
25. Savchenko–Pererva, M.Yu., Potapov, V.O., Radchuk, O.V. & Rozhkova, L.G. (2016). Improving the efficiency of vortex dust catchers for food industry. *Industrial technology and engineering, Kazakhstan*, 3(20), 62–69.
26. Savchenko–Pererva, M.Yu. & Yakuba, O.R. (2015). Improving the efficiency of counter–swirling devices for the food industry. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 3/10 (75), 43–48. DOI: 10.15587/1729–4061.2015.43785
27. Sabadash, S.M., Yakuba, O.R. & Kazakov, D.D. (2015). Development of the post–alcohol stillage drying process on inert bodies and output of criterion dependence. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 1/6(73), 65–70. DOI:10.15587/1729–4061.2015.38056
28. Vasiliev, A., Stefanenko, I.V., Azarov, V.N. & Nikolenko, D.V. (2019). The study of the aerodynamic characteristics of dust particles in the air of roadside areas. *E3S Web of Conferences* (Vol.126, 00071). Publisher: EDP Sciences. doi.org/10.1051/e3sconf/201912600071.
29. Zhukova, N.S., Ostaali, M., & Kheday, D.S. (2016). About fractional breakthrough dust for emissions to atmosphere after a cyclone. *Biosphere compatibility: people, regions, technologies*, 1(13), 68–76.
30. Zhukova, N.S., Dobrinskij, D.R., & Azarov, A.V. (2017). Reduction of pollutant concentrations under adverse weather conditions with optical dynamic measurement systems. In *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 1–3). IEEE. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076488

Савченко-Перерва М. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Радчук О. В., кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПИЛОЗБІРНИКІВ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У даній роботі представлено дослідження процесів, що відбуваються в апаратах із зустрічними закрученими потоками, та запропоновано математичну модель для розрахунку часткової та загальної ефективності пристроїв. На експериментальному стенді було досліджено типову та удосконалену конструкції апарату із зустрічними закрученими потоками. Для визначення загальної ефективності зразки досліджували на дисперсний склад за допомогою скануючого електронного мікроскопа з низьковакуумною камерою SEM–106 I та стрічкою з напиленням сріблом у вакуумному універсальному посту ВУП–5М. Недоліком типової конструкції вдосконаленого апарату із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП) є зменшений обертальний рух первинного потоку, що уповільнює процес сепарації та призводить до зниження фракційної ефективності очищення середніх і дрібних фракцій запиленого продукту з повітря. Гальмуючий ефект обумовлений малим вхідним імпульсом руху в первинному потоці порівняно з імпульсом руху в вторинному потоці. Таким чином, у типовій конструкції АЗЗП нижній вихор євдвічі менший за верхній, а імпульс потоку дорівнює швидкості повітряного потоку. Одним із способів збільшення обертального руху первинного потоку може бути збільшення вдвічі $M_{вх1}$, відповідно до закону збереження імпульсу, за рахунок геометричних змін нижньої циліндричної частини апарату. Тобто, необхідно збільшити діаметр нижньої частини АЗЗП, щоб збільшити імпульс у первинному потоці осьового завихрювача. У цьому випадку співвідношення витрат повітря та імпульсів буде зрівноважено і ефект гальмування буде усунений. Завдяки розробленій математичній моделі видно, що зі збільшенням імпульсу руху в первинному потоці осьового завихрювача підвищується ефективність увловлювання дрібних частинок пилоподібного продукту у зовнішньому та внутрішньому шарах розділової камери вдосконаленого АЗЗП. Це покращує загальну продуктивність. Після підготовки зразків до аналізу та дослідження їх на растровому мікроскопі отримали зображення дисперсного складу продукту, на якому розраховували кількість частинок певного діаметра, а потім розраховували їх у відсотках до загальної кількості частинок в одному зразку, таким чином отримали ефективність для кожної фракції частинок. А саме, найменша частка захоплених частинок складала 1,99 мкм удосконаленого АЗЗП, типової конструкції – 2,55 мкм. Отже, завдяки розробленій математичній моделі імпульсу руху для первинного завихрювача була створена вдосконала конструкція АЗЗП.

Ключові слова: пилозбірник, витрати, покращення, ефективність, захоплення, імпульс.

Дата надходження до редакції: 02.12.2021 р.

ФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСМОТИЧНОЇ ДЕГІДРАТАЦІЇ ЯК СПОСОБУ ОБРОБКИ КОРЕНЕПЛІДНИХ ОВОЧІВ

Самілик Марина Михайлівна

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0002-4826-2080

maryna.samilyk@snau.edu.ua

*У статті наведено результати експериментального дослідження осмотичного зневоднення коренеплідних овочів. Як предмет дослідження використовували стиглі коренеплідні овочі: моркву (*Daucus*) Шантане, столовий буряк (*Beta vulgaris*) Бордо 237, пастернак (*Pastinaca sativa*) Білий лелека. Як осмотичний розчин використовували цукрові розчини різних концентрацій (50, 60, 70%). Експеримент проведено за різних температур (40, 50, 60 °С) та з різною тривалістю процесу (1; 1,5; 2; 2,5 год). Дослідження показало, що частинки овочів розмірами менше 5 мм можуть розварюватися і мають непривабливу зморщену форму та суху консистенцію після висушування. Частинки розміром 10 мм мають характерну форму, але в них навіть після 2,5 годин дегідратації спостерігається відчутний запах та присмак овочів, що негативно впливає на сенсорні показники якості. Запропоновано подрібнення овочевої сировини на кубики розміром 5×5×5 мм, що забезпечує однакової шлях дифундування та гарні органолептичні властивості готового продукту для всіх видів досліджуваних овочів. За результатами експериментальних досліджень та математичних розрахунків визначено оптимальні параметри ведення процесу осмотичної дегідратації під час виробництва овочевих цукатів. Встановлено, що найбільша динаміка зневоднення спостерігається в першу годину дегідратації, коли різниця концентрацій сахарози в осмотичному розчині та всередині частинок найбільша. Найбільше перенесення маси спостерігається у разі використання розчину зі вмістом сахарози 70%. Така концентрація осмотичного розчину створює достатній осмотичний потенціал, тим самим спричиняючи більшу втрату води, уповільнюючи окисне та неферментативне підрум'янення, що дає змогу отримати продукт кращої якості. Активна масопередача відбувається в перші 2 години, тому процес можна обмежувати цим терміном, оскільки подальше зневоднення є економічно та технологічно недоцільним. Математично доведено, що осмотичне зневоднення овочів відбувається швидше під час перемішування цукрового розчину за рахунок зниження опору масообміну на поверхні й уникнення локалізованого розведення, яке впливає на швидкість видалення води.*

Ключові слова: осмотична дегідратація, овочі, осмотичний тиск, концентрація розчину, масопередача, питомий потік маси.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.8>

Вступ. Коренеплідні овочі є надзвичайно корисними й обов'язково представлені в денному раціоні харчування кожної людини. Саме тому виникає необхідність удосконалення методів їх зберігання.

Серед традиційних способів обробки рослинної сировини можна виділити: теплову обробку під дією високих температур (бланшування, розварювання, підігрівання, обжарювання, пасерування); теплову обробку під дією низьких температур (охолодження, заморожування); зневоднення; ферментативне консервування. У процесі високотемпературної теплової обробки відбуваються зміни структурно-механічних, фізико-хімічних, біохімічних, хімічних, мікробіологічних та органолептичних властивостей сировини, відбуваються зміни харчової та біологічної цінності (Samilyk et al., 2020).

Одним із кращих методів збільшення терміну зберігання фруктів та овочів є осмотичне зневоднення (дегідратація). Переваги цього методу полягають у тому, що він дає змогу максимально зберегти в овочах початковий вміст вітамінів і мінералів, природний колір, аромат і смак (Yadav & Singh, 2014).

Осмотичне зневоднення – це процес видалення води, який передбачає замочування сировини, в основному фруктів та овочів, у гіпертонічному розчині, напри-

клад, концентрованому цукровому сиропі, що спричиняє два одночасні потоки масопередачі: потік води від продукту до навколишнього розчину і вливання розчинених речовин у продукт (Falade & Igbeka, 2007).

Процес широко використовується під час розроблення нових продуктів, оскільки він позитивно впливає на харчові і сенсорні властивості свіжих фруктів, плодів та овочів. Розроблено різноманітні режими ведення процесу залежно від властивостей сировини (Ahmed et al., 2016; Khan, 2012; Phisut, 2012; Tortoe, 2010).

Фізичний зміст процесу осмотичної дегідратації пояснюється тим, що концентровані розчини твердих речовин мають більш високий осмотичний тиск і меншу активність води. Різниця хімічних потенціалів води у сировині та осмотичному розчині є рушійною силою зневоднення (Hasanuzzaman et al., 2014).

Процес видалення води під час осмотичної дегідратації відбувається за рахунок дифузії і капілярного потоку, тоді як поглинання розчиненої речовини або вилугування відбувається тільки шляхом дифузії (Akbarian et al., 2014; Rahman, 2009). На процес осмотичної дегідратації також впливають і фізико-хімічні властивості, молекулярна маса, розчинність і іонний стан розчиненої речовини (Beristain et al., 1990).

Встановлено оптимальні умови дегідратації деяких овочів за концентрації цукрового розчину 20–60%: температури – 38 °С, тривалості – 100 хв. (Corzo & Gomez, 2004).

Існують також дискусії щодо обсягу осмотичного середовища. За збільшення кількості осмотичного розчину підвищується швидкість масопередачі, збільшуються втрати води, але це призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Крім того, збільшення вмісту твердих речовин і загальної масопередачі може знизити якість продукту за рахунок зміни смаку продукту і більшої міграції природних речовин в осмотичне середовище (Khoji & Hesari, 2007).

Аналіз літературних джерел показав, що основними показниками, які впливають на процес осмотичного зневоднення, є: температура та концентрація осмотичного розчину, тривалість процесу, розмір частинок сировини, що зневоднюється, співвідношення кількості матеріалу й осмотичного розчину, швидкість руху розчину.

Нами запропоновано використання осмотичної дегідратації для виробництва цукатів із коренеплідних овочів. З цією метою необхідно встановити оптимальні параметри процесу дегідратації, розробити раціональний режим його проведення.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі завдання:

- визначити оптимальну концентрацію та температуру осмотичного розчину;
- визначити оптимальну тривалість процесу;
- дослідити вплив розміру частинок сировини на швидкість масопередачі;
- обґрунтувати доцільність перемішування у процесі осмотичної дегідратації.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження проводилися на кафедрі технологій та безпечності харчових продуктів Сумського національного аграрного університету. Як предмет дослідження використовували стиглі коренеплідні овочі таких сортів, як: морква (*Daucus*) Шантане, столовий буряк (*Beta vulgaris*) Бордо 237, пастернак (*Pastinaca sativa*) Білий лелека. Для проведення осмотичної дегідратації застосовували рідинний термостат MLW-16 з робочим об'ємом 0,01 м³.

Для визначення оптимальних розмірів частинок проведено дослідження стійкості овочів до температур. Овочі подрібнювали та сортували на фракції розмірами 3, 5 та 10 мм. Шматочки овочів відповідних фракцій занурювали у скляні конічні колби (по 4 колби з кожною фракцією) із концентрованим цукровим розчином (70%). Співвідношення цукрового розчину й овочів у всіх колбах становило 1:2. Колби одночасно поміщали в термостат із температурою 50 °С та через певний час (1 год, 1,5 год, 2 год, 2,5 год) по черзі виймали і відділяли овочі від сиропу. Отримані зразки висушували у лабораторній вакуум-сушарці за температури 50 °С протягом 1 години. Висушені зразки досліджували органолептично.

Математичні розрахунки для встановлення оптимальних параметрів процесу проводили за допомогою відомих загальноприйнятих рівнянь.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Одним із основних чинників, що впливають на умови осмотичного зневоднення, є осмотичний тиск. Він відноситься до колігативних властивостей речовини, оскільки залежить від концентрації розчиненої речовини, а не її хімічної природи.

Осмотичний тиск – це надлишковий тиск у розчині, який необхідний для запобігання перенесення розчинника через напівпроникну мембрану. Він описується рівнянням Ван-Гоффа:

$$p = CRT, \quad (1)$$

де p – осмотичний тиск, Па;

C – концентрація розчину, моль/м³;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура, К.

Під час досліджень розраховували осмотичний тиск, спричинений цукровими розчинами, зі вмістом сухих речовин 50, 60 та 70% (відповідають концентраціям цільового компоненту відповідно 1462, 1754 та 2047 моль/м³). Розрахунки для розчинів зі всіма запропонованими концентраціями проведено з урахуванням різних температур зневоднення – 40, 50 та 60 °С (313, 323, 333 К). Результати розрахунку наведено на рис. 1.

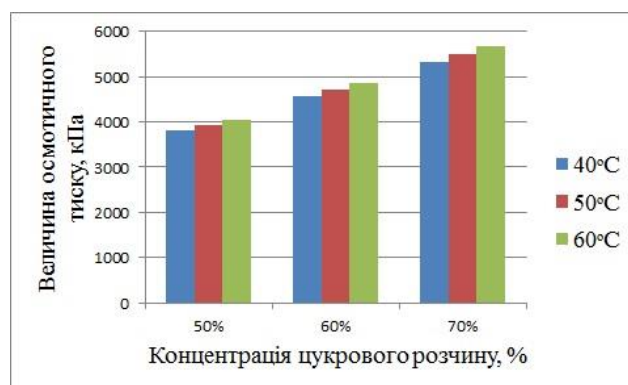


Рис. 1. Залежність величини осмотичного тиску від концентрації цукрового розчину та температури

Результати розрахунку показали, що за збільшення концентрації цукрового розчину та температури підвищується осмотичний тиск. Оскільки оптимальною температурою, за якої зберігається біологічна цінність овочів, є 50 °С, пропонується для зневоднення використовувати цукровий розчин зі вмістом сухих речовин 70%, який забезпечує найвищий осмотичний тиск за цієї температури. Така концентрація осмотичного розчину створює достатній осмотичний потенціал, тим самим спричиняючи більшу втрату води, уповільнюючи окисне та неферментативне підрум'янення, що дає змогу отримати продукт кращої якості.

Маса цільового компонента, перенесена з однієї фази в іншу за одиницю часу, визначає продуктивність масопередачі і відповідає потоку маси, який розраховується за формулою:

$$M = \frac{dm}{d\tau}, \quad (2)$$

де M – маса речовини, що продифундувала за одиницю часу, кг/год;

dm – маса цільового компонента (сахарози), перенесена з однієї фази в іншу за одиницю часу, кг;

dt – тривалість процесу, год.

З метою визначення оптимальної тривалості процесу дегідратації розраховували питомий потік маси, відносячи потік маси до робочого об'єму апарату:

$$q_v = \frac{M}{V} = \frac{dc}{d\tau}, \quad (3)$$

де q_v – питомий потік маси, кг/м³·год;

V – робочий об'єм апарату, м³.

Спочатку розраховували масу цільового компоненту, що переноситься в результаті осмотичної дегідратації. Враховуючи, що всередині термостату встановлено перемішувач для постійного перемішування розчину і вирівнювання температур, можна вважати, що потік маси рівномірно розподіляється по всьому об'єму апарату.

Таким чином, можна розрахувати масу цільового компоненту, що переноситься в процесі дегідратації, знаючи концентрацію осмотичного розчину за формулою:

$$dm = V \cdot dc, \quad (4)$$

де dc – концентрація цільового компоненту, кг/м³.

Гradient концентрації між розчином та внутрішньоклітинною рідиною є рушійною силою відведення води із сировини.

Розрахунки проводили, використовуючи різні концентрації сахарози: 50% (500 кг/м³), 60% (600 кг/м³), 70% (700 кг/м³) та різну тривалість процесу (від 1 до 2,5 год).

Результати розрахунку продуктивності масопередачі залежно від тривалості процесу та концентрації осмотичного розчину наведено на рис. 2.

Встановлено, що найбільше перенесення маси спостерігається у разі використання розчину зі вмістом сахарози – 70%. Активна масопередача відбувається в перші 2 години, тому процес можна обмежувати цим терміном, оскільки подальше зневоднення є економічно та технологічно недоцільним.

Відповідно до закону Фіка маса речовини, що продифундувала за одиницю часу за постійної температури

і тиску, залежить від коефіцієнту дифузії та gradientу концентрацій:

$$M = -DS \frac{dc}{dx}, \quad (5)$$

де D – коефіцієнт дифузії, м²/с;

S – площа перерізу, через який відбувається дифузія, м²;

dc/dx – gradient концентрації. Знак мінус показує, що дифузія йде в бік зменшення концентрації.

Із рівняння (5) видно, що площа дифундування впливає на швидкість масопередачі. Маса речовини, що продифундувала, прямо пропорційна площі перерізу, через який відбувається дифузія, та обернено пропорційна товщині шару або довжині шляху дифундування. Площа перерізу, через який відбувається дифузія, залежить від розміру та форми часточок сировини, що подається на дегідратацію. Це підтверджує те, що форма і розмір частинок впливають на швидкість процесу, тому мають регулюватися.

Результати впливу розмірів сировини на характер зневоднення наведені в табл. 1.

Дослідження показало, що частинки овочів розмірами менше 5 мм можуть розварюватися і мають непривабливу зморщену форму та суху консистенцію після висушування. Частинки розміром 10 мм мають характерну форму, але в них навіть після 2,5 години дегідратації спостерігається відчутний запах та присмак овочів, що негативно впливає на сенсорні показники якості. Тому запропоновано подрібнювати овочеву сировину (*Beta vulgaris*, *Daucus*, *Pastinaca sativa*) на кубики розміром 5×5×5 мм. При такій формі спостерігаються гарні органолептичні властивості готового продукту та забезпечується однаковий шлях дифундування.

У процесі дослідження також визначали зміну масової частки сухих речовин у розчині за допомогою рефрактометра. Результати зміни вмісту сухих речовин у сиропі наведено на рис. 3.

Із графіка видно, що найбільша динаміка зневоднення спостерігається в першу годину дегідратації, коли різниця концентрацій сахарози в осмотичному розчині та всередині частинок найбільша. Впродовж наступного

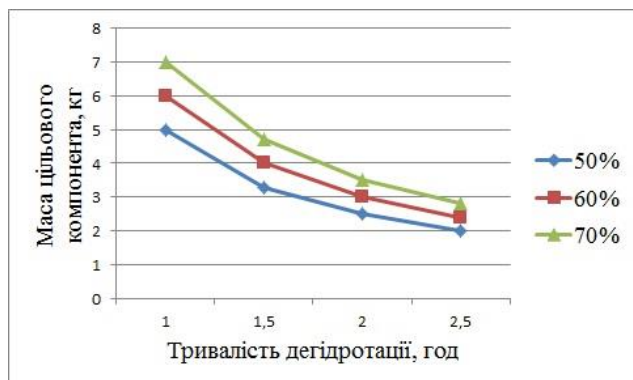


Рис. 2. Залежність маси, що переноситься, від тривалості процесу та концентрації осмотичного розчину

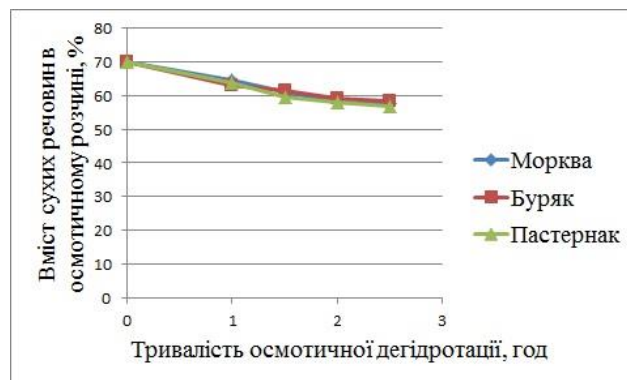


Рис. 3. Зміна вмісту сухих речовин у сиропі

Дослідження впливу розмірів сировини на характер зневоднення

Розмір фракцій, мм	Тривалість дегідратації, год	Характеристика зневоднених частинок		
		морква	буряк	пастернак
3×3×3	1	Частинки зморщені. Консистенція суха. Запах цукровий. Смак солодкий		
	1,5	Частинки зморщені. Консистенція суха. Запах цукровий. Смак солодкий		
	2	Частинки дуже зморщені, подекуди розварені. Консистенція суха. Запах цукровий. Смак солодкий		
	2,5	Частинки дуже зморщені, подекуди розварені. Консистенція суха. Запах цукровий. Смак солодкий		
5×5×5	1	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Запах цукровий з легким ароматом овочу. Смак солодкий з присмаком овочу		
	1,5	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Запах цукровий. Смак гармонійно солодкий		
	2	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Запах цукровий. Смак гармонійно солодкий		
	2,5	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Запах цукровий. Смак гармонійно солодкий		
10×10×10	1	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Відчутний запах овочу. Смак солодкий з присмаком овочу		
	1,5	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Відчутний запах овочу. Смак солодкий з присмаком овочу		
	2	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Відчутний запах овочу. Смак солодкий з присмаком овочу		
	2,5	Частинки не зморщені. Консистенція не суха. Ледь відчутний запах овочу. Смак солодкий з присмаком овочу		

часу вміст сухих речовин в осмотичному розчині змінюється незначною мірою, що дає змогу обмежити час дегідратації до 2 год.

Відомо, що швидкість процесу масопередачі прямо пропорційна різниці концентрацій та обернено пропорційна кінетичному (дифузійному) опору середовища:

$$W_m = \frac{M}{F \cdot \tau} = \frac{\Delta C}{R_d} \quad (6)$$

де ΔC – різниця концентрацій (рушійна сила масообміну);

R_d – дифузійний опір;

M – маса речовини, що перейшла з однієї фази в іншу, кг;

F – поверхня контакту фаз, м²;

τ – тривалість зневоднення, с.

Оскільки за збільшення дифузійного опору швидкість масопередачі знижується, осмотичне зневоднення овочів відбувається швидше за умови перемішування сиропу або його циркуляції. Це відбувається через зниження опору масообміну на поверхні за рахунок уникнення локалізованого розведення, яке впливає на швидкість видалення води. Перемішування дає змогу інтенсифікувати процес.

Однак перемішування може бути ускладнене і викликати пошкодження зразків, що зневоднюються. Тому в розробленому нами апараті для осмотичної дегідратації (Samilyk et al., 2020) для перемішування передбачено лопатеву мішалку обтікаючої форми без гострих кутів.

Обговорення. Доведено, що для попереднього зневоднення варто використовувати цукровий розчин зі вмістом сухих речовин 70%, який забезпечує найвищий осмотичний тиск за цієї температури. Подібні результати

було отримано (Gribova & Berketova, 2018) під час зневоднення ягід. Отримані нами результати, як і результати інших дослідників (Ahmed et al., 2016; Khan, 2012; Phisut, 2012; Tortoe, 2010), свідчать про те, що застосування осмотичної дегідратації перед сушінням дозволяє покращити органолептичні властивості готового продукту.

Технічний результат осмотичного зневоднення пояснюється тим, що попередня обробка сировини перед процесом сушіння підвищує його ефективність за рахунок зменшення енергетичних витрат, поліпшує структуру готового продукту, запобігає знебарвленню плодів, спричиненому ферментативним окисненням.

Висновки. Результати аналізу наявних наукових праць та власних досліджень показали що:

– найвищий осмотичний тиск за температури 50 °C, оптимальної для збереження біологічної цінності овочів, забезпечується за концентрації цукрового розчину 70%;

– висока концентрація осмотичного розчину створює достатній осмотичний потенціал, тим самим спричиняючи більшу втрату води, уповільнюючи окисне та неферментативне підрум'янення, що дає змогу отримати продукт кращої якості;

– оптимальна тривалість процесу, яка забезпечує ефективне зневоднення і гарні сенсорні властивості продукту, – 2 год.;

– розмір і форма зразків, що зневоднюються, впливають на характер зневоднення та швидкість масопередачі, найкращі результати досягаються у разі подрібнення овочів на кубики розміром 5×5×5 мм;

– швидкість масопередачі залежить від руху осмотичного середовища, оскільки дає змогу знижувати опір масообміну на поверхні за рахунок уникнення локалізованого розведення.

Бібліографічні посилання:

1. Ahmed, I., Qazi, I., Jamal S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the Preservation of Fruits and Vegetables. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 34, 29–43. (in English). DOI: 10.1016/j.ifset.2016.01.003.
2. Akbarian, M., Ghasemkhani, N., Moayedi F. (2014). Osmotic dehydration of fruits in food industrial: A review *International Journal of Biosciences*. vol. 4, no 1. pp. 42–57. (in English). DOI: 10.12692/ijb/4.1.42–57.
3. Beristain, Cl., Azuara, E., Cortes, R., Garcia, HS. (1990). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *Intl J Food Sci Technol*. 25(5):576–582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01117>.
4. Corzo, O., Gomez, ER. (2004). Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using desired function methodology. *J Food Eng*. 20. 64, 213–219. <https://doi.org/10.3136/fstr.15.575>.
5. Falade, K.O., Igbeka, J.C. (2007). Osmotic Dehydration of Tropical Fruits and Vegetables. *Food Reviews International*. 23, 4. (in English). <https://doi.org/10.1080/87559120701593814>.
6. Gribova N.A., Berketova L.V. (2018). Osmoticheskaya degidratatsiya yagod: izucheniye parametrov massoperenosa [Osmotic dehydration of berries: study of mass transfer parameters]. Moscow: Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. vol. 80. no. 2. pp. 30–37. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-2-30-37.
7. Hasanuzzaman, M., Kamruzzaman, M., Islam, M., Khanom, S., Rahman, M., Lisa L. et al. (2014). A Study on Tomato Candy Prepared by Dehydration Technique Using Different Sugar Solutions. *Food and Nutrition Sciences*. 5, 1261–1271. DOI: 10.4236/fns.2014.513137.
8. Khan, M.R. (2012). Osmotic Dehydration Technique for Fruits Preservation A-Review. *Pakistan Journal of Food Science*, 22, 71–85. (in English). DOI: 10.12691/ajfst-7-6-2.
9. Khoyi, MR., Hesari, J. (2007). Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *J Food Eng*. 78:1355–1360. (in English). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.0.
10. Phisut, N. (2012). Minireview- Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *International Food Research Journal*, 19(1), 7–18.
11. Rahman, M.S. (2009). A Review of “Handbook of Food Preservation”. *Journal of Agricultural & Food Information*. 10. URL: <https://doi.org/10.1080/10496500902813376>.
12. Samilyk, M., Helikh, A., Bolgova, N., Potapov, V., Sabadash, S. (2020). The application of osmotic dehydration in the technology of producing candied root vegetables. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 3(11), 13–20. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204664>.
13. Tortoe, C. (2010). A Review of Osmodehydration for Food Industry. *African Journal of Food Science*, 4, 303–324.
14. Yadav, A.K, Singh, S.V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol*. 51(9), 1654–1673. DOI:10.1007 / s13197-012-0659-2.

SAMILYK M.M., PHD, SUMY NATIONAL AGRARIAN UNIVERSITY, SUMY, UKRAINE

PHYSICAL JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF OSMOTIC DEHYDRATION AS A METHOD OF PROCESSING ROOT VEGETABLES

*The article presents the results of an experimental study of osmotic dehydration of root vegetables. Ripe root vegetables were used as the subject of the study *Daucus (Chantane)*, *Beta vulgaris (Bordeaux 237)*, *Pastinaca sativa (White stork)*. Sugar solutions of various concentrations (50, 60, 70%) were used as an osmotic solution. The experiment was carried out at different temperatures (40, 50, 60 ° C) and with different duration of the process (1; 1.5; 2; 2.5 h). Research has shown that vegetable particles less than 5 mm in size can boil over and have an unattractive wrinkled shape and dry consistency after drying. Particles with a size of 10 mm have a characteristic shape, but even after 2.5 hours of dehydration, there is a noticeable smell and taste of vegetables, which negatively affects the sensory indicators of quality. The proposed grinding of vegetable raw materials into cubes of 5×5×5 mm, which provides the same diffusion path and good organoleptic properties of the finished product for all types of investigated vegetables. Based on the results of experimental studies and mathematical calculations, the optimal parameters for conducting the process of osmotic dehydration in the production of candied vegetables have been determined. It was found that the greatest dynamics of dehydration is observed during the first time of dehydration, when the difference in sucrose concentrations in the osmotic solution and inside the particles is greatest. The greatest mass transfer is observed when using a solution with a sucrose content of 70%. This concentration of the osmotic solution creates a sufficient osmotic potential, thereby leading to a greater loss of water, slowing down oxidative and non-enzymatic browning, resulting in a better product. Active mass transfer occurs in the first 2 hours, so the process can be limited to this period, since further dehydration is economically and technologically inexpedient. It is mathematically proven that osmotic dehydration of vegetables occurs faster when mixing the sugar solution, by reducing the resistance to mass transfer on the surface and avoiding localized dilution, which affects the rate of water removal.*

Key words: osmotic dehydration, vegetables, osmotic pressure, solution concentration, mass transfer, specific mass flow.

Дата надходження до редакції: 15.12.2021 р.

THE CHARACTERIZATION OF SILVER COATING ON THE SURFACE OF TIN BRONZE BY ELECTRO-SPARK DEPOSITION

Zhang Zhengchuan

PhD Student

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0002-7874-6879

email: zzc0860@163.com

Silver, as a soft material, is used in the construction of bearings that carry high loads and high speeds, and has good lubrication characteristics, mechanical properties and corrosion resistance. There are many methods of forming a suitable coating, but the process of applying Ag coating to the surface of a tin-bronze bearing sleeve using electrospark deposition (ESD) technology to improve operating conditions has not been sufficiently described. In the article the investigated coating is obtained on a tin bronze substrate, which was formed as a result of ESD with the use of silver as a soft antifriction material. The morphology, composition and properties of the coating were studied. The Ag coating on the surface of tin bronze that was formed by alternately electro-spark deposition applying the soft material of silver. The analysis of deposition on mass transfer, roughness, thickness, surface morphology, elemental composition and tribological properties of the Ag coating were investigated by electronic scales, 3D optical profilometers, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersion spectrum (EDS) and tribometer. The results show that the soft material coating of silver is dense, uniformly distributed and metallurgical fusion with the substrate. The coating of silver was deposited on the surface of tin bronze by electro-spark deposition. The optimal process parameter was obtained as follows: the voltage is 60V, the duty cycle is 25%, the efficiency is 1min/cm². Under the optimal process parameters, the mass transfer is 25.0mg, the surface roughness of the Ag coating is 15.46μm and the thickness is 15μm. In particular, the layer obtained under the optimal process parameters reduces surface micro-cracks and has a relative smooth and dense surface with good integrity. The Ag coating have a good metallurgical bonding with the substrate, and the microstructure of the deposition is compact. Due to the rapid heating and cooling of the substrate surface by ESD technology, the grains in the deposition layer are very dense, refined, uniformly distributed. The tribological properties of the coating in dry friction show that the lower resistance is exhibited by the Ag coating deposited using the soft antifriction material. The surface friction coefficient is stable after running-in, and becomes stable throughout the test and the minimum friction coefficient of the Ag coating is about 0.31 after running-in stage. The wear mechanism of the Ag coating is dominated by plastic deformation, abrasive wear and slight polishing. Plastic deformation and abrasive wear dominated on the relatively soft Ag coating. Silver and copper have very good wettability, which is conducive to improving the metallurgical bonding performance between metals during ESD. However, the performance of silver as antifriction material coating needs to be further improved.

Key words: coating, surface, electro-spark deposition (ESD), soft material, tribological properties.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.9>

Introduction

The bearing tin bronze alloys exhibit better mechanical properties as compared with the Babbitt. Analyzing of their work has shown that the damageability of the bronze pads is exposed in the form of constrained running, high wear and high probability of scoring (Manu et al., 2021; Wang et al., 2018). Thus, there is need to provide for the bronze bearing pads with special coating improving the running conditions.

Tin bronze has good thermal conductivity and can effectively eliminate the heat generated by friction as a substrate material (Tarel'nik et al., 2017; Chen et al., 2021). Soft metal silver is used in the design of bearings bearing high loads and high speeds and has good lubrication performance, mechanical properties and corrosion resistance (Yuan et al., 2020). Silver and copper have very good wettability, which is conducive to improving the metallurgical bonding performance between metals during ESD.

There are many methods to prepare the related coating, but there are few reports on how to deposit the Ag coating on the surface of tin-bronze bearing bush by electro-spark

deposition (ESD) technology to improve the operating conditions.

The coating of the tin bronze surface that was formed by ESD applying the soft antifriction material of silver. The analysis of morphology, composition and properties of the coating were investigated.

Materials and research methodology

The material QSn10-1(Cu 89.10%, Sn 9.38%, P 0.72%, Others 0.80%) was cut into size 29mm*25mm*4mm as the substrate. Silver (Ag99.99%) was used to make 3mm in diameter for electro-spark deposition electrode.

The surface of the substrate and the electrodes was ground on silicon carbide grinding papers of different grain size (400, 600, 800, 1200 and 1500 grit) and the roughness of the surface is not greater than 1μm. Prior to deposition of the coating, the substrates and electrodes were cleaned in anhydrous ethanol for 20 minutes by ultrasonic cleaner.

The ESD machine HMT-9500 has a control panel to change the electrical parameters including ESD voltage (20V-100V), duty cycle (20%-100%), rotation speed (150r/min-880r/min) and frequency (50Hz-500Hz). The ESD

machine has the ground attachment, the shielding gas outlet and the applicator attachment. The rotation direction can be controlled on the applicator.

Travel speed in both cases was 2mm/s. The rotation speed of the layers was 550r/min and the frequency was 400Hz. Deposition was carried out using a hand-held gun at room temperature with the argon gas (Ar 99%) protection (10L/min flow rate), which avoids contamination of the deposit zone by interstitial elements such as oxygen or nitrogen.

The electro-spark deposition process parameters (electrodes, voltage, duty cycle and efficiency) are shown in Table 1.

Table 1

The ESD parameters of the Ag coating

Specimens	Electrodes	Voltage (V)	Duty cycle (%)	Efficiency (min/cm ²)
1#	Ag	40	20	1
2#	Ag	60	25	1
3#	Ag	80	30	1

The mass transfer data were constructed in weighing the specimens on a Mettler Toledo AL204 balance with an accuracy of 0.1 mg.

Surface roughness and topography measurements were made using 3D optical profilometers of Bruker Contour GT-k1.

ESD treated surface morphology and wear scars were analysed using scanning electron microscopy (SEM) of FEI Quanta 200. The element composition on the surface of the Ag coating was characterized by energy dispersion spectrum (EDS) built into SEM.

Samples for the microstructural analysis were prepared from the cross sections of Ag coating block and mounted in bakelite. After polishing and cleaning, corrosion was applied with 4% nitric acid alcohol. ESD treated cross section morphology of the Ag coating was analysed using metallographic microscopy LECIA DMi8 M.

An assessment of tribological properties was performed in the ball-on-plate reciprocating rig on aMWF-500tribometer. The study is to investigate tribological properties of ESD layers under dry friction conditions. The test temperature was 25°C. The low sliding velocity of 20mm/s was chosen to ensure boundary lubricating conditions and was maintained constant for all the stripes. The track length was 6 mm. The 8 mm diameter bearing steel (GCr15) ball was used as counter-face. The applied loads were 5N, 10N and 15N. For the initial 600 seconds, the applied load was 5N, the following 600 seconds, have more load of 10N, and then to 15N for the final 600 seconds.

Results and analysis

In this study, the analysis of deposition on mass transfer, roughness, and thickness of the Ag coating were investigated, as shown in Table 2.

The electro-spark deposition coating is the result of gradual accumulation through multiple discharge and a large number of deposition points (Wang et al., 2021). The

mass transfer is usually regarded as an important index to evaluate ESD (Zhang et al., 2021). At the beginning of deposition, the coating mass increases most obviously. With the increase of deposition time, the mass transfer of electrode to substrate gradually decreases. Finally, with the increase of deposition time, the mass of substrates tops increasing. This is because with the increase of deposition time, the content of oxide or nitride on the surface of the coating increases, the residual stress on the surface increases, the binding force decreases, and the material is more likely to splash during discharge, which impedes the mass transfer in the process of ESD.

In this study, a precision electronic balance with an accuracy of 0.1mg was used to measure the samples and calculate the mass added to the substrate after ESD, as shown in Table 2. From the point of spark discharge rule, the larger of the discharge energy, the mass of the more increase (Uman-skyi et al., 2020; Hong et al., 2017), and Table 2 shows that the increase of the mass as the energy increases. When the voltage is 40V, the duty cycle is 20%, the efficiency is 1min/cm², the minimum value of mass transfer is 16.8mg. When the voltage is 80V, the duty cycle is 30%, the efficiency is 1min/cm², the maximum value of mass transfer is 32.3mg.

The Bruker Contour GT-K1 3D optical profilometers was used to observe the surface of the deposition layer and measure the surface roughness. As can be seen from Table 2, the roughness increases with the increase of deposition energy. When the voltage is 40V, the duty cycle is 20%, the efficiency is 1min/cm², the minimum value of the surface roughness is 11.09µm. When the voltage is 80V, the duty cycle is 30%, the efficiency is 1min/cm², the maximum value of the surface roughness is 23.84µm.

The surface roughness of the Ag coating is not only affected by the deposition parameters, but also affected by the operation technology, the mechanical accuracy of the welding torch and the properties of the deposited materials.

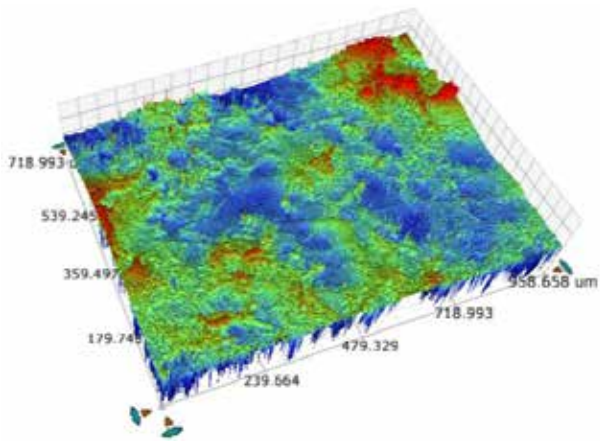
The measured results of the coating surface topography and profile are shown in Fig. 1. It can be seen from the figure that, Fig. 1, a, Fig. 1, b and Fig. 1, c, the surface topography gradually becomes rough, and the change of surface profile curve gradually increases.

The thickness of the Ag coating is the most important index of ESD. As can be seen from Table 2, the coating thickness increases with the increase of deposition energy. When the voltage is 40V, the duty cycle is 20%, the efficiency is 1min/cm², the minimum value of the thickness is 9µm. When the voltage is 80V, the duty cycle is 30%, the efficiency is 1min/cm², the maximum value of the thickness is 21µm.

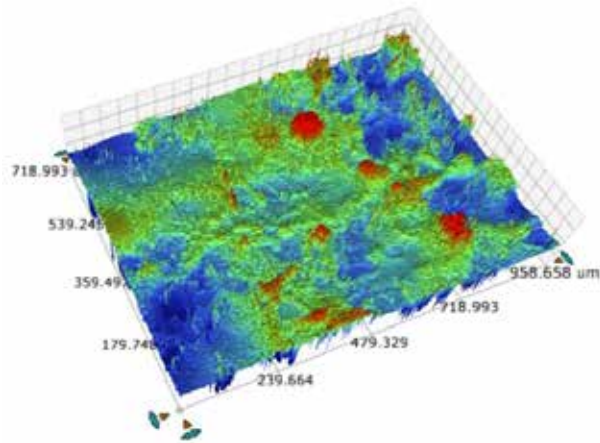
Table 2

The mass transfer, roughness and thickness characteristics of the Ag coating

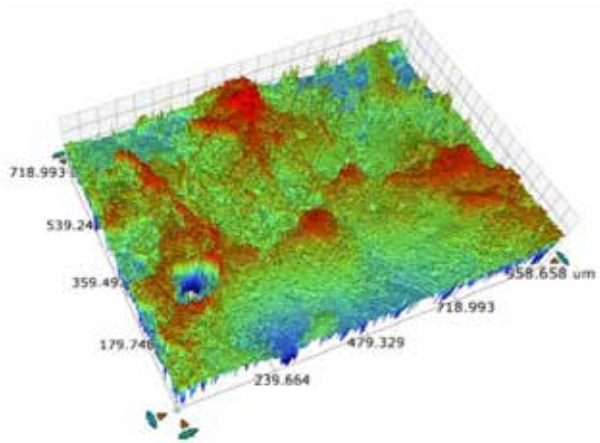
Specimens	Electrodes	Mass transfer(mg)	Roughness R _a (µm)	Thickness (µm)
1#	Ag	16.8	11.09	9
2#	Ag	25.0	15.46	15
3#	Ag	32.3	23.84	21



a



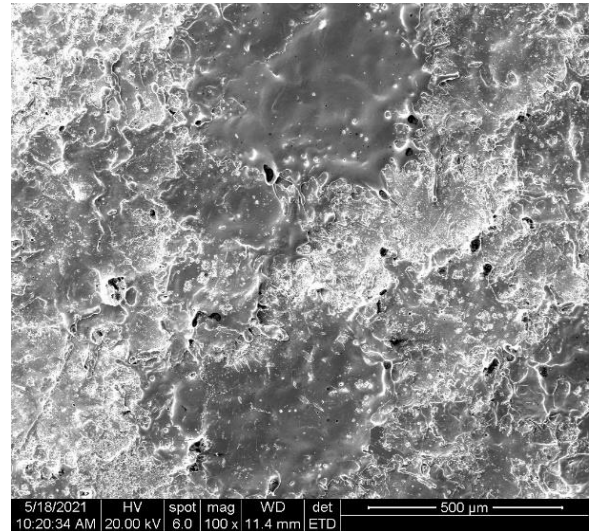
b



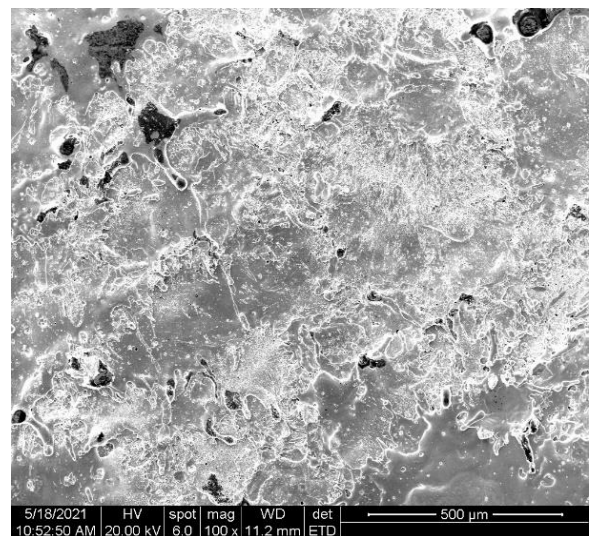
c

Figure 1. The surface topography and profile of the Ag coating (a-Specimen 1#, b-Specimen 2#, c-Specimen 3#)

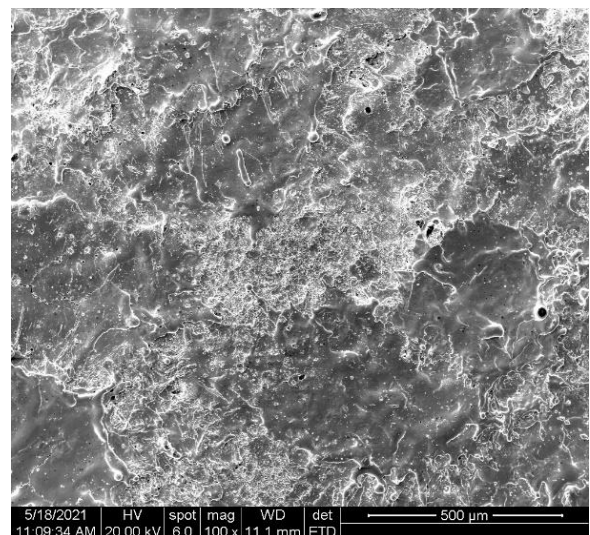
The morphology of the Ag coating surface is shown in Fig. 2. It can be seen from the figure that the surface of the deposited coating is sputtering stacking, which is formed by the superposition of many irregular small droplet spots melted by continuous pulse discharge. There are a few microcracks on the surface of the Ag coating, which tend to



a



b



c

Figure 2. The morphology of the Ag coating surface (a-Specimen 1#, b-Specimen 2#, c-Specimen 3#)

propagate along the direction perpendicular to the surface of the coating. This is due to the rapid heating and cooling in the process of spark discharge, the residual thermal stress in the coating will exist, leading to the initiation of micro-cracks, and Ag with good plasticity can play a role in relieving the thermal stress, thus reducing the number of cracks. The multilayer structure with a low modulus ratio contributed to reduced stress concentration in harder sub-layer, thereby inhibiting crack initiation.

After deposition, only simple grinding is needed to meet the requirements of surface roughness. The prepared coating surface has a small amount of ferrous metal oxides due to oxidation, which is caused by the oxidation of copper in bronze alloy. It can also be seen from Fig. 2 that the surface of Specimen 1# in Fig. 2, **a** has dense discharge spots and more rough surfaces. With the increase of discharge energy, discharge spots and smooth surfaces increase. That's because the higher the energy, the more molten the metal at the interface, the more fluid it is.

The element composition on the surface of the Ag coating was characterized by energy dispersion spectrum (EDS) in Table 3. As can be seen from the table, with the increase of discharge energy, the content of elements on the surface of the sample changes little and the copper content is relatively high which indicates that the coating thickness is not too thick, and the good wettability between silver and copper can make the metallurgical combination better.

Table 3

The elemental composition of the Ag coating surface

Specimens	P(%)	Cu(%)	Ag(%)	Sn(%)
1#	0.29	40.74	56.46	2.51
2#	0.19	38.14	59.60	2.06
3#	0.18	45.31	51.09	3.41

Electro-spark deposition technology can effectively change the surface of the physical and chemical properties, mechanical properties, so that the tribological properties of the surface changes, which has special properties (Tarelnyk et al., 2018; Cao et al., 2017; Wei et al., 2018).

Table 4 compares the evolution of the coefficient of friction at the applied loaded of 5N, 10N and 15N of the ESD modified samples sliding against a GCr15 steel ball in air. For the initial 600 seconds at load of 5N of Specimen 1#, the friction coefficient with an average value of about 0.33. The following 600 seconds at load of 10N, the friction coefficient is about 0.24. And then to 15N for the final 600 seconds, the friction coefficient is about 0.35. The friction coefficient of the coating after running-in is slightly larger mainly because of the thinner coating. For the initial 600 seconds at load of 5N of Specimen 2#, the friction coefficient with an average value of about 0.69. The following 600 seconds at load of 10N, the friction coefficient is about 0.36. And then to 15N for the final 600 seconds, the friction coefficient is about 0.31. The friction coefficient of the coating is slightly larger at the beginning of the run-in mainly because of the increase of the surface roughness of the coating. For the initial 600 seconds at load of 5N of Specimen 3#, the friction coefficient with an average value of about 0.20. The

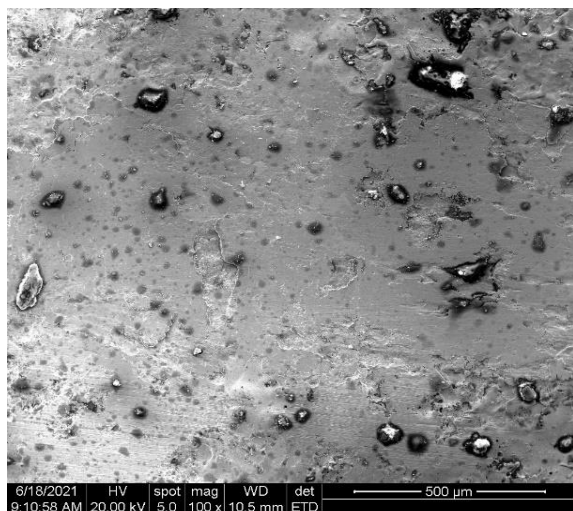
following 600 seconds at load of 10N, the friction coefficient is about 0.22. And then to 15N for the final 600 seconds, the friction coefficient is about 0.31. The reason why the friction coefficient of the coating is small at the beginning of run-in is that the coating thickness increases and the surface is more prone to plastic deformation. The investigation of the tribological properties of the coating in dry friction show that the lower resistance is exhibited by the coating deposited using the soft antifriction material.

From the evolution of the coefficient of friction of the tin bronze substrate with the Ag coating, it is clear that wear process indicated is rather complicated because of the influence of different surface topography and chemical composition during running-in phase (Zhou et al., 2022; Tarelnyk et al., 2012; Xue et al., 2021). For ESD layers, at the beginning of steady stage its friction coefficient shows to some extent direct response to surface roughness and the coating thickness. Because GCr15 with high hardness produce material loss of soft antifriction Ag coating counterpart (with relative low hardness) through dominant abrasion mechanism. With the generation of tribofilm, abrasion of coating-GCr15 sliding couples is transferred to interfacial sliding. Similar to other sliding couples, the steady-state friction coefficients become more or less independent of surface roughness. The friction coefficient is stable after running-in, and becomes stable throughout the test.

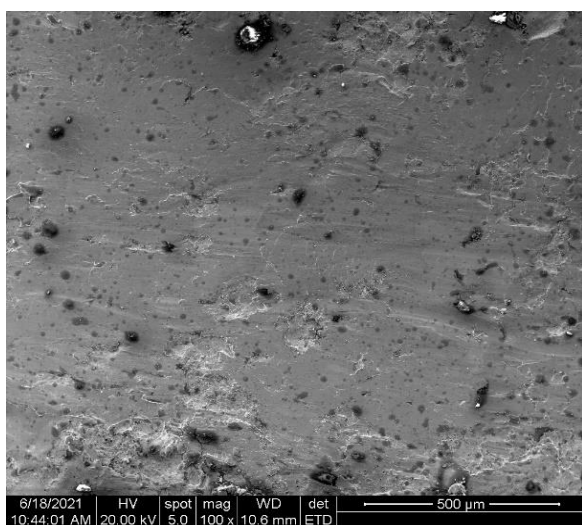
The surfaces of wear traces were analysed in order to understand the friction and wear resistance mechanisms of the coating. The wear scars of the tin bronze substrate with the Ag coating after tribological testing are shown in Fig. 3. It was found from analysis of wear scars in Fig. 3, **a** that the wear mechanism of the Specimen 1# is dominated by abrasive wear and fatigue delamination. The friction surface of Specimen 1# is smooth, the wear marks are fine and shallow, and some materials are spalling and forming spalling pits. The wear mechanism of the Specimen 2# is dominated by abrasive wear and plastic deformation that was found from analysis of wear scars in Fig.3, **b**. However, it can be seen in Fig. 3, **c** that the soft antifriction coating may effectively restrain fatigue delamination, showing plastic deformation, abrasive wear and slight polishing. Plastic deformation and abrasive wear dominated on the relatively soft Ag coating. The initial surface microgeometry was changed during load application and its surface became smooth with fine shallow scratches observed after the wear test. After the smooth surface was formed, the friction and wear stabilised.

The elemental composition of the Ag coating surfaces after tribological testing are shown in Table 5. By comparing Table 3 and Table 5, it can be found that copper content on the surface of specimen 1# decreases from 40.74% to 38.29%, silver content decreases from 56.46% to 46.52%. The tin content on the surface changed little before and after the friction test. In addition, carbon and oxygen elements were detected on the surface, indicating the formation of carbides and oxides after surface wear.

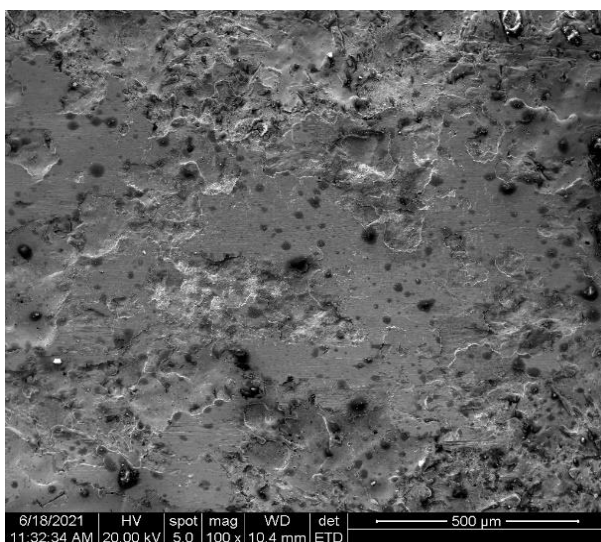
By comparing Table 3 and Table 5, it can be found that after friction test, copper content on the surface of specimen 2# increases from 38.14% to 45.45%, silver content decreases from 59.60% to 46.32%. The tin content on the



a



b



c

Figure 3. The wear scars of the tin bronze substrate with the coating after tribological testing (a-Specimen 1#, b-Specimen 2#, c-Specimen 3#)

surface changed little before and after the friction test. In addition, the low content of carbon and oxygen detected on the surface indicates that due to the good stability of silver, less carbides and oxides are produced after surface wear.

By comparing Table 3 and Table 5, it can be found that copper content on the surface of specimen 3# decreases from 45.31% to 41.48%, silver content decreases from 51.09% to 34.72%. The contents of tin on the surface of specimen 3# have little change after friction test. In addition, the higher carbon and oxygen elements content detected on the surface indicates that due to the poor stability of tin and copper, more oxides are generated after ESD. However, due to the large surface roughness, the oxides and carbides on the surface have not been completely removed.

Table 4

The friction coefficient during coating tests at loads of 5 N, 10 N, and 15 N

Specimens	5N	10N	15N
1#	0.33	0.24	0.35
2#	0.69	0.36	0.31
3#	0.20	0.22	0.31

Table 5

The elemental composition of the Ag coating surface after tribological testing

Specimens	C(%)	O(%)	Cu(%)	Ag(%)	Sn(%)
1#	7.63	4.76	38.29	46.52	2.81
2#	1.03	5.52	45.45	46.32	1.68
3#	11.27	11.05	41.48	34.72	1.48

Conclusions

The following conclusions can be drawn from observed results:

(1) The coating of silver was deposited on the surface of tin bronze by electro-spark deposition. The optimal process parameter was obtained as follows: the voltage is 60V, the duty cycle is 25%, the efficiency is 1min/cm². Under the optimal process parameters, the mass transfer is 25.0mg, the surface roughness of the Ag coating is 15.46μm and the thickness is 15μm. In particular, the layer obtained under the optimal process parameters reduces surface micro-cracks and has a relative smooth and dense surface with good integrity.

(2) The Ag coating have a good metallurgical bonding with the substrate, and the microstructure of the deposition is compact. Due to the rapid heating and cooling of the substrate surface by ESD technology, the grains in the deposition layer are very dense, refined, uniformly distributed.

(3) The tribological properties of the coating in dry friction show that the lower resistance is exhibited by the Ag coating deposited using the soft antifriction material. The surface friction coefficient is stable after running-in, and becomes stable throughout the test and the minimum friction coefficient of the Ag coating is about 0.31 after running-in stage.

Silver and copper have very good wettability, which is conducive to improving the metallurgical bonding performance between metals during ESD. However, the performance of silver as antifriction material coating needs to be further

improved. The wear mechanism of the Ag coating is dominated by plastic deformation, abrasive wear and slight polishing. Plastic deformation and abrasive wear dominated on the relatively soft Ag coating.

References:

1. Manu, K., Jezierski, J., Ganesh, M.R.S., Shankar, K.V., & Narayanan, S. A. (2021). Titanium in Cast Cu-Sn Alloys A Review. *Materials*, 14(16), 4587.
2. Wang, J., Wang, D., Wang, X., Jia, Q., Chen, R., & Cui, Y. (2018). Property Improvement of Tin-based Babbitt B83 Based on Metallography Control. *Materials Science and Technology*, 26(5), 89–96.
3. Tarel'nik, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Kosenko, P.V., & Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and solutions in renovation of the rotors of screw compressors by combined technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7), 540–546.
4. Chen, Y., Yu, M., Cao, K., & Chen, H. (2021). Advance on Copper-based Self-lubricating Coatings. *Surface Technology*, 50(2), 91–100. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.010>
5. Yuan, X., Guan, N., Hou, G., Chen, X., & Ma, S. (2020). Research Progress on Reliability and Preparation of High Temperature Solid Self-lubricating Coatings. *Materials Reports*, 34(3), 05061-05067. doi: <https://doi.org/10.11896/cldb.18110171>
6. Wang, W., Du, M., Zhang, X., Luan, C., & Tian, Y. (2021). Preparation and Properties of Mo Coating on H13 Steel by Electro Spark Deposition Process. *Materials*, 14(13), 3700.
7. Zhang, Y., Li, L., Chang, Q., Wang, X., Zhao, Y., Zhu, S., Xu, A., & Gao, X. (2021). Research Status and Prospect of Electro-Spark Deposition Technology. *Surface Technology*, 50(1), 150–161. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.012>
8. Umanskyi, O.P., Storozhenko, M.S., Tarelnyk, V.B., Koval, O.Y., Gubin, Y. V., Tarelnyk, N. V., & Kurinna, T. V. (2020). Electrospark deposition of FeNiCrBSiC–MeB 2 coatings on steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59(1), 57–67.
9. Hong, X., Feng, K., Tan, Y. F., Wang, X., & Tan, H. (2017). Effects of Process Parameters on Microstructure and Wear Resistance of TiN Coatings Deposited on TC11 Titanium Alloy by Electrospark Deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8), 1767–1776. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60199-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60199-7)
10. Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I., Martsynkovskyy, V., Zhukov, A., & Kurp, P. (2018). Comparative Tribological Tests for Face Impulse Seals Sliding Surfaces Formed by Various Methods. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019,382. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_40
11. Cao, T., Sun, H., & Wang, X. (2017). Self-lubricating Coating Prepared by Electro-spark Deposition Using Electrode with Drilled Holes at End Face. *Journal of Materials Engineering*, 45(10), 88–94. doi: <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000691>
12. Wei, X., Chen, Z., Zhong, J., Huang, Q., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2018). Influence of Deposition Atmosphere on Structure and Properties of Mo₂FeB₂-Based Cermet Coatings Produced by Electro-Spark Deposition. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(4), 1199-1204.
13. Zhou, Y., Zhao, H., & Zuo, X. (2022). Analysis of multi-stage running-in process of Sn-11Sb-6Cu alloy and AISI 1045 with phase trajectory plot. *Journal of Tribology*, 144(6), 1–14.
14. Tarelnyk, V., Martsynkovskiy, V., & Konoplianchenko, I. (2012). Electroerosive Alloying Modes Optimization at Formation of a Special Microrelief on Bronze Sliding Bearings Friction Surfaces Selected Problems of Mechanical Engineering and Maintenance. *Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej*, 188, 98–103.
15. Xue, Y., Shi, X., Zhou, H., Yang, Z., Zhang, J., Wu, C., & Xue, B. (2021). Effects of textured surface combined with Sn-Ag-Cu coating on tribological properties and friction-induced noise of Ti-6Al-4V alloy. *Tribology Transactions*, 64(3), 562–577.

Чжан Чженчуань, аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКРИТТЯ ЗІ СРІБЛА НА ПОВЕРХНІ ОЛОВ'ЯНОЇ БРОНЗИ, СФОРМОВАНОГО МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ОСАДЖЕННЯ

Срібло як м'який матеріал використовується у конструкції підшипників, які несуть високі навантаження і високі швидкості, і має хороші характеристики змащення, механічні властивості та стійкість до корозії. Існує багато методів формування відповідного покриття, але не достатньо описаний процес нанесення Ag-покриття на поверхню олов'яно-бронзової втулки підшипника за допомогою технології електроіскрового осадження (ESD) для покращення умов експлуатації. У статті досліджене покриття, отримане на підкладці з олов'янистої бронзи, яке було сформоване в результаті ESD із застосуванням срібла як м'якого антифрикційного матеріалу. Досліджено морфологію, склад і властивості покриття.

Приведено технологію формування Ag-покриття на поверхні олов'яної бронзи, яке утворене шляхом почергового електроіскрового осадження (ESD) нанесенням м'якого матеріалу срібла. Аналіз впливу осадження на масообмін, шорсткість, товщину, морфологію поверхні, елементний склад і трибологічні властивості Ag-покриття досліджували за допомогою електронних ваг, 3D-оптичних профілометрів, скануючої електронної мікроскопії (SEM), спектру енергетичної дисперсії (EDS) та трибометра. Покриття зі срібла наносили на поверхню олов'яної бронзи електроіскровим напиленням. Оптимальний параметр процесу був отриманий таким чином: напруга 60 В, робочий цикл 25%, продуктивність 1 хв/см². За оптимальних параметрів процесу масообмін становить 25,0 мг, шорсткість поверхні Ag-покриття – 15,46 мкм, а товщина – 15 мкм. Зокрема, шар, отриманий

за оптимальних параметрів процесу, зменшує поверхневі мікротріщини і має відносно гладку і щільну поверхню з хорошою цілісністю. Ag-покриття має хороший дифузійний зв'язок із підкладкою, а мікроструктура осадження компактна. Завдяки швидкому нагріванню та охолодженню поверхні підкладки за технологією ESD зерна в шарі осадження дуже щільні, витончені, рівномірно розподілені. Трибологічні властивості покриття при сухому терті показують, що менший опір демонструє Ag-покриття, нанесене з використанням м'якого антифрикційного матеріалу. Коефіцієнт поверхневого тертя стабільний після обкатки і стає стабільним протягом випробування, а мінімальний коефіцієнт тертя Ag-покриття становить приблизно 0,31 після етапу обкатки. У механізмі зношування Ag-покриття переважають пластична деформація, абразивне зношування та незначне полірування. На відносно м'якому Ag-покритті переважали пластична деформація та абразивне зношування. Срібло і мідь мають дуже хорошу «змочуваність», що сприяє покращенню ефективності дифузійного зчеплення між металами під час електростатичних розрядів. Однак ефективність застосування срібла як антифрикційного покриття потребує подальшого покращення.

Ключові слова: покриття, поверхня, електроіскрове осадження (ESD), м'який матеріал, трибологічні властивості.

Date of receipt: 07.12.2021