ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.331 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.3-15

Д.Ю. Артеменко, доц., канд. техн. наук, **В.А. Онопа,** доц., канд. техн. наук,
О.А. Кислун, доц., канд. техн. наук, **К.А. Муленко,** магістр
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua

Теоретичне обґрунтування конструктивних особливостей котка для передпосівного обробітку ґрунту

В статті наведені результати пошукових теоретичних досліджень конструктивних особливостей котка для передпосівного обробітку ґрунту. Аналіз існуючих конструкцій сучасних прикочуючих котків для передпосівного обробітку ґрунту і технологічного процесу, який вони виконують, показав, що на сьогоднішній день номенклатура конструкцій зростає, універсальність падає, під кожен тип робіт потрібен свій коток, суцільне формування ущільненого дна посівного ложа сучасними котками в повній мірі не виконується. Встановлено, що більш раціональним буде технологічний процес коли прикочування відбувається не лише у верхніх шарах ґрунту, а і у нижніх. З цією метою був запропонований комбінований прикочуючий коток з робочими елементами кулачкового типу. Розроблена математична модель взаємодії прикочуючого котка і його елементів з ґрунтом. Запропонована математична модель процесу роботи удосконаленого котка дозволяє встановити характер розподілення питомого тиску в залежності від конструктивних параметрів елементів котка і фізико-механічних властивостей ґрунту. Ефективність запропонованої конструкції прикочуючого котка забезпечується тим, що за рахунок конструкції робочої поверхні та кулачків можна забезпечити рівномірне ущільнення ґрунту по ширині захвату котка і на потрібну глибину та зменшення кількості проходів котка для забезпечення необхідної рівномірності ущільнення.
сприятливі умови проростання, конструкція прикочуючого котка, ущільнення ґрунту, комбінований прикочуючий коток

Постановка проблеми. Передпосівний обробіток ґрунту є ключовою технологічною операцією для забезпечення необхідних умов для проростання висіяного насіння, а якість його виконання напряму впливає на отримання високих та сталих врожаїв [1]. В Україні з цією метою використовуються дискові або лапові ґрунтообробні агрегати, до складу яких входять прикочуючі котки. Котки можуть використовуватись як окремий робочий орган та виконувати такі технологічні операції як: вирівнювання поверхні поля, руйнування брил і подрібнення грудок, розпушення і підповерхневе ущільнення ґрунту, руйнування поверхневої кірки [2]. По кількості операцій прикочуючий коток можна розглядати як один із головних засобів для забезпечення якісної підготовки поля під посів. Тому процес прикочування необхідно розглядати як комплекс операцій, а його конструкцію – як комбінацію останніх.

Технологічний процес прикочування сприяє оптимальному розміщенню насіння на задану глибину, покращує контакт між насінням і ґрунтом, сприяє швидкому набуханню та проростанню насіння. Головною метою прикочування є збереження вологості в ґрунті, особливо в посушливих умовах, шляхом зменшення фізичного випаровування. Створений прикочуванням ущільнений шар можна розглядати як фільтр, який знижує витік пароподібної вологи, особливо коли вода в ґрунті обмежена.

© Д.Ю. Артеменко, В.А. Онопа, О.А. Кислун, К.А. Муленко, 2023

Вплив котка на ґрунт залежить від його щільності, вологості, механічного та структурного складу. Ефективність ущільнення котка залежить від його маси, діаметра та ширини захвату. Котки поділяють на легкі, середні та важкі залежно від питомого тиску на поверхню ґрунту. Питомий тиск варіюється від 0,2 до понад 1 кг/см^2 [3].

За формою поверхні котки розрізняють на гладкі, кільчасті, рубчасті, кільчасто-шпорові, голчасті та інші. Котки з кільчастими або кільчасто-шпоровими поверхнями добре підходять для одночасного ущільнення та розпушування поверхневого шару ґрунту. Прикочування застосовується під час посіву різних культур, а також після посіву, для зменшення пористості ґрунту та збереження вологості після робіт, таких як оранка, культивація та розпушування. Даний метод є особливо ефективним в умовах посухи [4].

Поряд з ефективністю використання прикочування при передпосівній обробці ґрунту постає проблема у низькій універсальності конструкцій вже існуючих котків. Так, широкого використання в Україні мають котки вітчизняного виробництва кільчасто-шпорові, кільчасто-зубчасті, борончасті котки ЗККШ-6, ККН-2,8, КБН-3, перелік видів конструкцій котків закордонного виробництва нараховує більше десяти найменувань [5-9]. Така велика кількість конструкцій і асортимент вимагає від фермерських господарств значних фінансових витрат і проведення додаткових робіт по визначенню раціональності використання їх для вирощування культур, якими займається господарство. Тому необхідні подальші дослідження над удосконаленням конструкції котка для передпосівного обробітку ґрунту, який зміг би покривати більшість технологічних операцій, які виконуються при прикочуванні.

Аналіз основних досліджень і публікацій. З метою визначення перспективного напрямку по удосконаленню конструкції прикочуючого котка для передпосівного обробітку ґрунту необхідно провести аналіз вже існуючих конструкцій котків, які використовуються в Україні.

Так, відомий виробник сільськогосподарської техніки фірма Kuhn [5], пропонує коток для передпосівного обробітку ґрунту в складі дискового ґрунтообробного агрегату для одночасного прикочування і формування насіннєвого ложа. Коток має циліндричну поверхню з розміщеними на ній плоскими радіальними робочими елементами (рис. 1), які призначені для формування ущільненого шару ґрунту на глибині посіву і може використовуватись як окремий робочий орган.



Рисунок 1 – Коток 4400 in Action

Джерело: розроблено авторами з використанням [5]

Але основним недоліком такої конструкції є плоский профіль робочого елемента, який формує ущільнений шар ґрунту у вигляді полоси, що зменшує ймовірність потрапляння насіння саме в зону підготовленого насіннєвого ложа.

Фірма Amazone [6] комплектує свої ґрунтообробні агрегати наступними конструкціями котків (рис. 2): трапецієвидний кольчастий TRW, зубчастий коток PW, гумовий-клиновий коток KW, гумовий-клиновий коток KWM з шинами Matrix, трубчатий коток SW. На рис. 2 виробник наводить результат роботи перелічених конструкцій котків, аналізуючи його, можна визначити переваги і недоліки таких робочих органів.

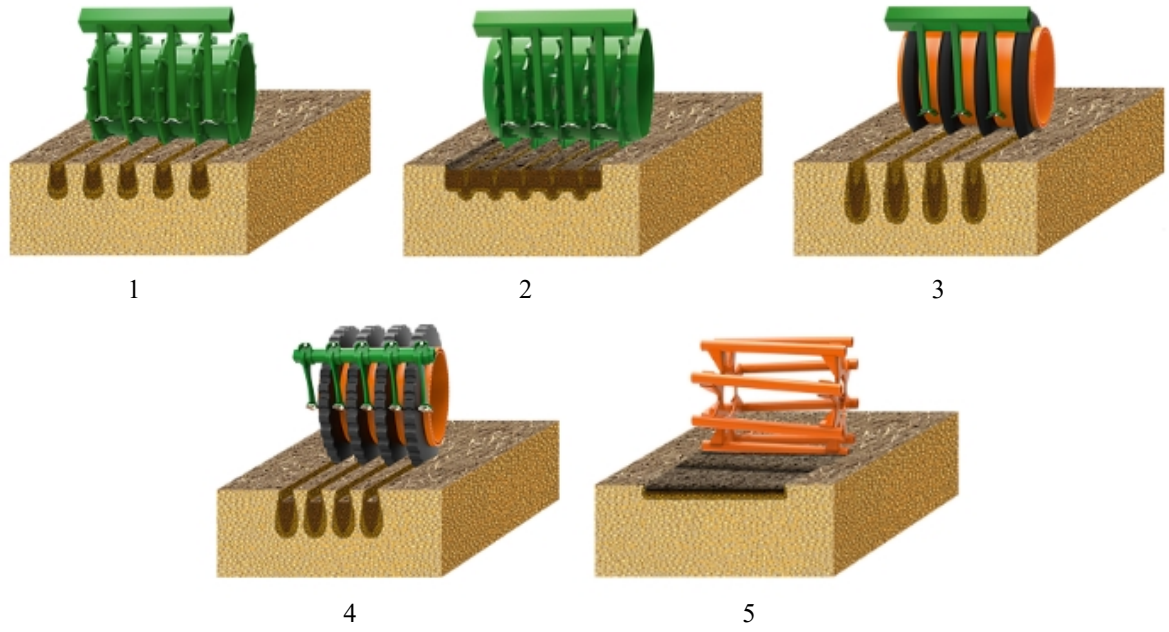


Рисунок 2 – Конструкції котків які виготовляє фірма Amazone:
1 – TRW; 2 – PW; 3 – KW; 4 – KWM; 5 - SW

Джерело: розроблено авторами з використанням [6]

До переваг можна віднести:

– коток TRW забезпечує смугове зворотне ущільнення за рахунок трапецієподібних кілець, висока несуча здатність дозволяє запобігти занадто глибокому зануренню на легких ґрунтах, зворотне ущільнення по всій контактуючий поверхні;

– коток PW з власним приводом проводить зворотне полосове ущільнення по всій поверхні ґрунту, за рахунок зубів відбувається подрібнення великих грудок;

– гумово-клиновий каток KW забезпечує смугове зворотне ущільнення майже на всіх типах ґрунтів за будь-яких умов, злипання, забивання, замулювання виключені, формує посівну борозну для полегшення ходу сошників;

– коток KWM з шинами Matrix відрізняється потужним власним приводом, а за рахунок профілю Matrix коток може формувати більше подрібненого ґрунту для насіннєвого ложа, полосове зворотне ущільнення та формування насіннєвого ложа, добре підходить для вологого і сухого ґрунту;

– трубчастий коток SW являє собою коток початкового рівня з особливо низькою масою, зворотне ущільнення проводиться паралельно до напрямку руху з оптимальним кришенням і відкритою структурою поверхні ґрунту.

Поряд із перевагами котків Amazone можна визначити головний недолік в роботі наведених конструкцій котків – посівне ложе готується по полосі, в якій іде робочий елемент котка, це доцільно при використанні систем точного землеробства, але такі системи в Україні доступні не всім, тому більш раціональним було б

формування суцільного насіннєвого ложа по всій ширині захвату робочої поверхні котка.

Фірма Horsch [7] комплектує свої ґрунтообробні агрегати Cruiser великим різноманіттям котків (рис. 3). Horsch пропонує для поверхневого і глибинного зворотного ущільнення відповідні рішення. Вибір котка обумовлений, перш за все, типом ґрунту, для цього в Horsch у кожному випадку є своє рішення. Зворотне ущільнення, необхідне усунення повітряних порожнин, подрібнення великих грудок і відтворення оптимального балансу водних і повітряних пор у ґрунті. Для більшої гнучкості у застосуванні для машини Cruiser XL був сконструйований новий коток SteelFlex (рис. 3, 5) та комбінація котків SteelDisc та RingFlex (рис. 3, 4,2). Таке системне рішення передбачає використання першого котка SteelDisc для глибинного ущільнення зі створенням умов для відновлення водних капілярів, а коток RingFlex служить для створення насіннєвого ложа з дрібногрудкуватою структурою ґрунту. Також для інших видів робіт пропонуються котки OptiRoll, OptiCover, RingFlex, подвійний RingFlex, SteelDisc, SteelFlex, для підготовки зябу, прутковий коток та подвійний RollPack (рис. 3).

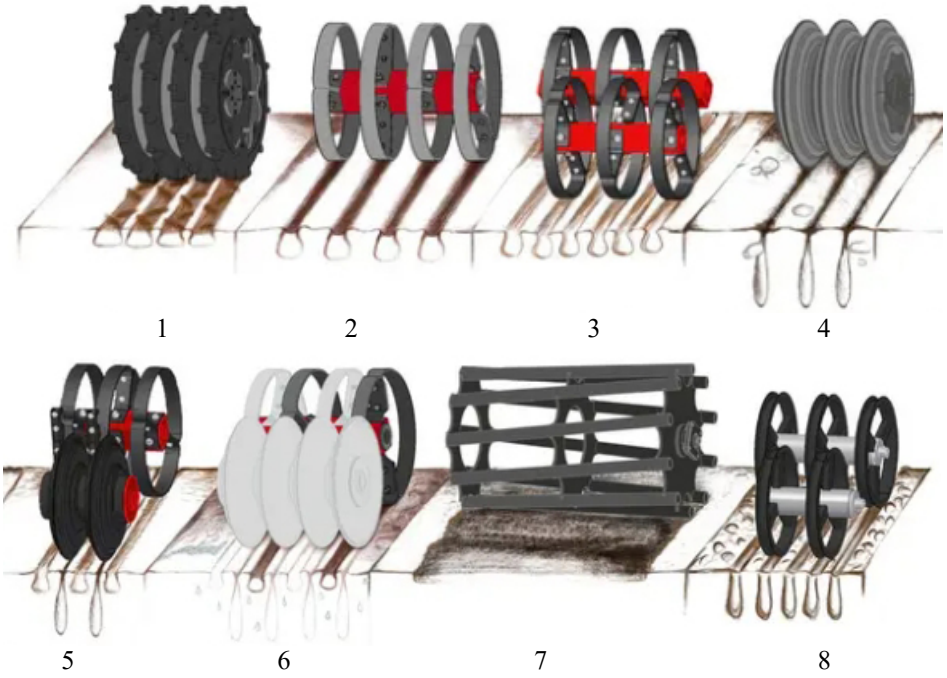


Рисунок 3 – Конструкції котків які виготовляє фірма Horsch:
1 – OptiRoll; 2 – RingFlex; 3 – Doppel RingFlex; 4 – SteelDisc; 5 - SteelFlex; 6 – SteelFlex als Winterpacker; 7 – Stabwalze; 8 – Doppel RollPack

Джерело: розроблено авторами з використанням [7]

Проводячи аналіз роботи котків Horsch [7], можна відмітити схожість конструкцій із конструкціями фірми Amazone [6], а також фірми Bednar [8], що говорить про те, що котки сучасних іноземних компаній направлені в основному на системи точного землеробства і не забезпечують формування суцільного по ширині захвату насіннєвого ложа та верхнього менш ущільненого шару ґрунту. Хоча котки фірми Farmet [9] і мають суцільний характер дії на ґрунт, вони не використовуються як окремий робочий орган, а лише у складі передпосівного агрегату і покликані в основному більше виконувати операцію подрібнення ніж ущільнення.

Не суцільний характер дії іноземних конструкцій котків в своїх дослідженнях підтверджує Шустік Л. [10], в роботі наголошується, що використання шпорового котка у передпосівному обробітку забезпечує порівняно із котком швелерного типу, кращу якість обробки і фінішну дію на ґрунт в комплексі з лаповими робочими органами, створюючи в посівному шарі оптимальні показники щільності ґрунту та збереження і підтягування вологи. Також робиться висновок, що швелерний коток раціонально застосовувати на операціях лущення, поверхневого і напівпарового обробітків ґрунту.

Іванюта М.В. [11], проводячи числове дослідження гладких котків, відмічає, що найбільше на характер ущільнення ґрунту на глибину до 10 см впливає діаметр котка, аналітично ним був встановлений оптимальний діаметр прикочуючого котка в межах 400–500 мм. В роботі робиться висновок, що збільшення діаметра котка не приносить якісних переваг процесу ущільнення ґрунту, а гладкий циліндричний коток при визначених діаметрах і навантаженні на ґрунт 550–750 Н може забезпечити якість ущільнення згідно агровимог. Нажаль, в дослідженні не показано, як розподіляються зони ущільнення при роботі циліндричного котка по ширині захвату.

В роботі [12], в результаті проведених експериментальних досліджень були визначені зони деформацій і ущільнення від дії прикочуючих котків просапних сівалок та зроблений висновок, що основною характеристикою котка поряд із діаметром і навантаженням на коток є геометрична форма його робочої поверхні.

Проведені динамічні дослідження по порівнянню роботи кольчасто-шпорових і зубчасто-шпорових котків [13], показали, що котки такого типу не можна вважати універсальними і застосовувати на всіх операціях грунтообробки, а обмежено при передпосівному обробітку ґрунту, в основному, на операціях подрібнення і покращання агрегатного складу поверхні поля. При підвищенні вологості, котки таких типів схильні до залипання, але в деяких конструктивних версіях можуть бути задіяні на певних операціях.

Степченко С. в [14], відмічає, що процес прикочування ґрунту як передпосівного, так і післяпосівного, є дуже відповідальною операцією в рослинництві. В роботі наводиться огляд конструкцій котків, як вітчизняного, так і закордонного виробництва та робиться висновок, що номенклатура котків росте, а виробники приділяють цьому робочому органу все більше уваги.

Рожков П.М. в своїх дослідженнях [15] особливу увагу приділяє якості прикочування. Автором вивчені закономірності деформації ґрунту котками, розроблена схема взаємодії котків з ґрунтом, отримані рівняння, що дозволяють визначити величину і характер розподілення полів напружень в зоні контакту котків з ґрунтом в залежності від їх конструктивних параметрів і деформаційних властивостей ґрунту, визначена раціональна форма котка для рівномірного його ущільнення. Також було встановлено, що для підвищення якості прикочування поперечний профіль котка повинен мати прямолінійну ділянку з криволінійними краями, а також використання котків з криволінійним профілем дозволяє підвищити врожайність сільськогосподарських культур.

Проведений аналіз конструкцій котків, а також досліджень їх роботи показав, що виробники сільськогосподарської техніки розширюють їх номенклатуру під окремі процеси сільськогосподарських задач. Перевага надається конструкціям котків, які працюють по окремому сліду, і на використання при технологіях точного землеробства під конкретні типи ґрунтів. Роботи над виробництвом технологічно досконалих універсальних робочих органів практично не ведуться, тому необхідно приділяти увагу для задоволення попиту не тільки великих агрохолдингів, які в змозі забезпечити в себе

повну номенклатуру котків під різноманітні потреби, а і невеликих господарствах, націлених на виробництво невеликої кількості культур. Тому існує потреба в розробці удосконаленої конструкції прикочуючого котка, який би мав невелику вартість і міг використовувати переваги вже існуючих конструкцій.

Для можливості подальшого удосконалення конструкції прикочуючого котка, необхідно мати уяву, що формує його робочі характеристики. Теоретичними і експериментальними дослідженнями [15-18] підтверджено наявність полів напружень і деформацій внутрішнього ґрунтового масиву під дією ґрунтообробних машин, на основі чого можна стверджувати, що характер їх розподілення є основною характеристикою процесу прикочування. Тому, формуючи необхідну конструкцію робочої поверхні котка, можна значно впливати на якість виконання технологічного процесу, а саме – забезпечити рівномірне ущільнення ґрунту по ширині і глибині захвату котка.

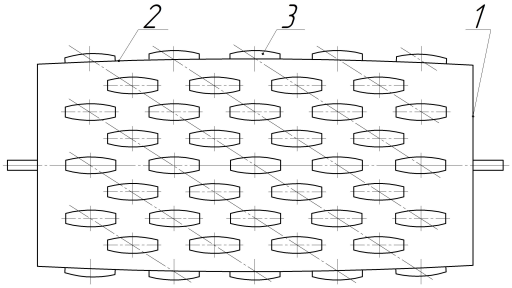
Постановка завдання. Мета роботи: покращення рівномірності ущільнення ґрунту по ширині захвату котка на задану глибину шляхом обґрунтування конструкції його робочої поверхні.

Для досягнення мети нами вирішувались наступні задачі:

1. провести аналіз сучасних конструкцій котків з метою визначення їх переваг і недоліків при виконанні технологічного процесу;
2. на основі визначених недоліків в роботі розробити удосконалену конструкцію прикочуючого котка;
3. розробити математичну модель процесу роботи удосконаленого прикочуючого котка та встановити в загальному вигляді характер розподілення питомого тиску під його робочою поверхнею.

Викладення основного матеріалу. Проведений аналіз роботи сучасних конструкцій прикочуючих котків показав, що на якість виконання технологічного процесу в значній мірі впливає, як конструкція самого котка, так і геометрична форма його робочої поверхні. Основними недоліками існуючих робочих органів є нерівномірне розподілення щільності по ширині захвату котка та дія їх робочих елементів лише на верхній шар ґрунту.

Для усунення вказаних недоліків нами запропонований коток з робочими елементами у вигляді кулачків [19], який виконаний дворівневим (рис. 4), перший рівень (обід котка) призначений для рівномірного ущільнення верхнього шару ґрунту, другий рівень утворений кулачками для рівномірного ущільнення нижнього шару ґрунту. Запропонований прикочуючий коток включає боковини 1 на яких розміщена робоча опукло-криволінійна поверхня 2, а на ній по гвинтовій кривій з перекриттям розміщені кулачки, які мають криволінійну поверхню 3 (надалі вважаємо, що поверхня як котка так і кулачка в перерізі має еліптичний профіль).



1 – боковини, 2 – робоча поверхня, 3 – кулачки

Рисунок 4 – Конструкція котка з робочими елементами у вигляді кулачків

Джерело: розроблено авторами

Робочий процес із запропонованим прикочуючим котком з робочими елементами кулачкового типу відбувається таким чином: в процесі роботи робоча поверхня 2 рівномірно ущільнює верхній шар ґрунту, а розміщені на ній по гвинтовій кривій кулачки 3 рівномірно ущільнюють нижній шар ґрунту, тим самим забезпечуючи рівномірну щільність по всій ширині захвату котка на максимальну глибину.

Основним критерієм, згідно якого можна визначити чи відповідає запропонована конструкція вимогам до формування рівномірної щільності в процесі роботи котка, є характер розподілення питомого навантаження по ширині і глибині його захвату.

Для створення математичної моделі процесу взаємодії прикочуючого котка з робочими елементами кулачкового типу і ґрунту та отримання картини розподілу питомого тиску під ним, можна використовувати методи механіки суцільного середовища [15, 16, 20]. Дослідження в напрямку механіки суцільних середовищ показують, що гіпотеза про суцільність має невелике відхилення від результатів експериментальних досліджень. Тому можна розглядати ґрунт як суцільне квазіоднорідне середовище, поведінку якого під навантаженням визначає співвідношення між напруженнями, деформаціями та їх похідними по часу [15, 16].

Взаємодію розробленого прикочуючого котка з робочими елементами кулачкового типу і ґрунту можна уявити як процес контакту двох тіл з різними модулями деформації. Подібну задачу загалом розглядають у теорії пружності [20]. З урахуванням симетрії, просторову задачу взаємодії котка з ґрунтом можна звести до розв'язання плоскої задачі, де форми взаємодіючих тіл описуються функціями: $y_1 = f_1(x)$ і $y_2 = f_2(x)$, де

$$y = y_1 + y_2 = f_1(x) + f_2(x). \tag{1}$$

На ділянках дотику $y = 0$:

$$f_1(x) + f_2(x) = 0. \tag{2}$$

Під дією стиску тіла набувають переміщення вздовж OY: α_1 і α_2. Тоді $\Delta = \alpha_1 + \alpha_2$ є зближенням між взаємодіючими тілами.

Поряд із зазначеними переміщеннями спостерігаються і пружні переміщення U_1 і U_2 вздовж осі OX. Тоді повне пружне переміщення вздовж осі OY:

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \Delta - f_1(x - U_1) - f_2(x - U_2). \tag{3}$$

Коли відбуваються малі переміщення вздовж осі OX то:

$$f_1(x - U_1) \approx f_1(x) \text{ і } f_2(x + U_1) \approx f_2(x),$$

тоді:

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \Delta - f_1(x) - f_2(x). \tag{4}$$

Без врахування сил тертя, розглянемо ґрунт як лінійно-деформоване середовище, на границю якого прикладений нормальний тиск $p(t)$. З цією метою можна використати відому в теорії пружності задачу Фламена (рис. 5).

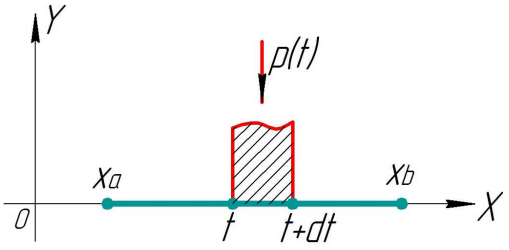


Рисунок 5 – Схема дії нормальної сили на ґрунт через ділянку деформатора
Джерело: розроблено авторами з використанням [20]

Оберемо на ділянці контакту відрізок від точки $x = t$ до $x = t + dt$, на який діє сила $p(t)dt$. Переміщення на границі ділянки контакту від зосередженої сили P дорівнює:

$$\vartheta = -\theta\, p(t)\ln\frac{1}{|t-x|} + C, \tag{5}$$

де θ – показник пружності, що характеризує деформаційні властивості взаємодіючих матеріалів:

$$\theta = \frac{2}{\pi E_o}\left(1-\mu^2\right), \tag{6}$$

$C = const$ – стала;

$|t-x|$ – відстань між точками осі OX з абсцисами x і t;

де E_o – модуль деформації (Н/м^2);

μ – коефіцієнт Пуассона.

Сила $p(t)dt$ прикладена до межі напівплощини в точці $x = t$, викликає в ній переміщення в напрямку дії сили:

$$d\vartheta = -\theta\, p(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt + C. \tag{7}$$

На ділянці контакту котка з ґрунтом можна визначити переміщення ϑ_1 і ϑ_2:

$$\vartheta_1 = \theta_1 \int_L p(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt + C, \tag{8}$$

$$\vartheta_2 = -\theta_2 \int_L p(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt + C. \tag{9}$$

Порівнюючи праві частини виразів (8), (9) і (4) та враховуючи загальне зміщення, отримуємо інтегральне рівняння для тиску $p(x)$, яке є основним при розв'язанні плоскої контактної задачі теорії пружності [20]:

$$(\theta_1 + \theta_2)\int_L p(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt = C - f_1(x) - f_2(x), \tag{10}$$

де $\int_L p(t)\ln\frac{1}{|t-x|}dt = f(x)$ – функція, що залежить від деформаційних властивостей та форми взаємодіючих тіл;

L – зона контакту котка з ґрунтом.

З рівняння (10), маємо:

$$f(x) = \frac{C - f_1(x) - f_2(x)}{\theta_1 + \theta_2}. \tag{11}$$

Функція $f(x)$ в рівнянні (10) визначається із умови задачі і вважається заданою всередині інтервалу границі контакту котка з ґрунтом.

Оскільки прийнята для дослідження поверхня прикочуючого котка та його робочих елементів у вигляді кулачків має опукло-криволінійну форму то в поперечному перерізі отримаємо профіль у вигляді частини еліпса. Тоді задачу можна звести до визначення дії деформатора еліптичної форми на ґрунтове середовище (рис. 6).

В нашому випадку профіль прикочуючого котка та його робочих елементів кулачків (рис. 6) описується рівнянням:

$$f(x) = a_e - \frac{a_e}{b_e}\sqrt{b_e^{\,2} - x^2}\,, \tag{12}$$

де b_e – велика піввісь еліпса;

a_e – мала піввісь еліпса;

x – поточна координата.

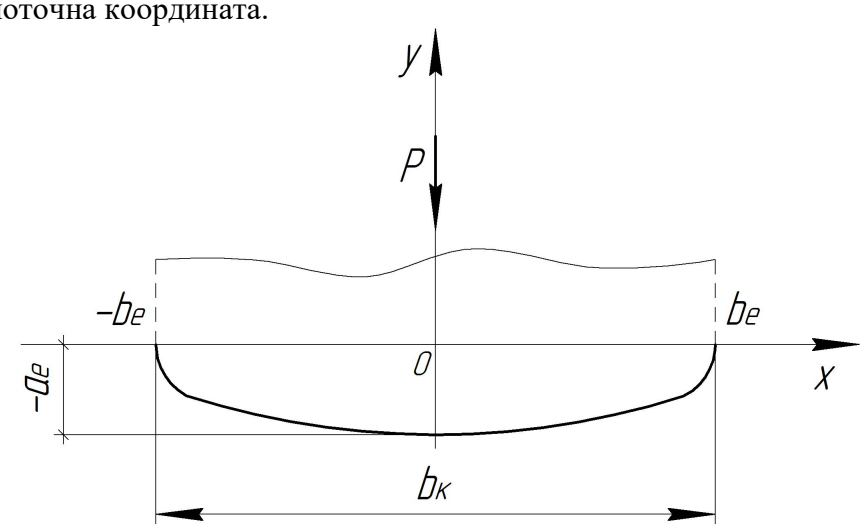


Рисунок 6 – Схема дії деформатора еліптичної форми на ґрунтове середовище
Джерело: розроблено авторами

Для даного випадку рішення основного рівняння контактної задачі теорії пружності дає можливість отримати закон розподілення тиску під робочою поверхнею котка:

$$p(x) = \frac{C}{\pi b_к^{\,2}(\theta_1 + \theta_2)}\sqrt{b_e^{\,2} - x^2}\,, \tag{13}$$

де $b_к = 2b_e$ – довжина зони контакту котка з ґрунтом;

θ_1 – деформаційна стала матеріалу котка;

θ_2 – деформаційна стала ґрунту.

Оскільки дійсні розміри деформатора невідомі то подальший аналіз проводимо у відносних одиницях, які залежать від матеріалу поверхні котка та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Приводимо (13) до вигляду:

$$p(z) = K\sqrt{1 - z^2}\,, \tag{14}$$

де $K = \dfrac{C}{\pi b_к^{\,2}(\theta_1 + \theta_2)}$ – постійний коефіцієнт;

$z = \dfrac{x}{b_e}$.

На основі (14) можна отримати графічну залежність функції у відносних одиницях (рис. 7).

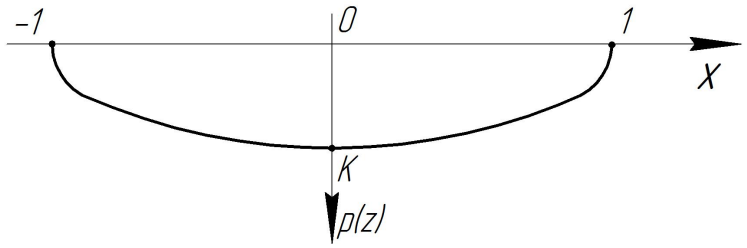


Рисунок 7 – Загальний вигляд розподілення питомого тиску в зоні контакту
Джерело: розроблено авторами

З рис. 7 видно, що характер розподілення питомого тиску в значній мірі відповідає конструктивним особливостям деформатора. В результаті чого можна стверджувати, що геометричні параметри деформатора є основною передумовою яка впливає на кінцевий результат – формування необхідної щільності ґрунту на всій ділянці контакту.

Розглянута математична модель дає можливість при проектуванні удосконаленої конструкції прикочуючого котка кулачкового типу врахувати не тільки властивості матеріалу його робочої поверхні, а і лінійні розміри. Також можна стверджувати, що коефіцієнт K , в склад якого входять деформаційні властивості взаємодіючих матеріалів θ_1 і θ_2 та лінійні розміри деформатора (елементи еліптичної поверхні b_e і a_e), напряму впливає на величину питомого тиску $p(x)$.

В загальному випадку, за умови розміщення удосконалених кулачків на поверхні котка з перекриттям, можна стверджувати, що характер розподілення питомого тиску по ширині захвату ґрунтового котка буде мати вигляд рис. 8.

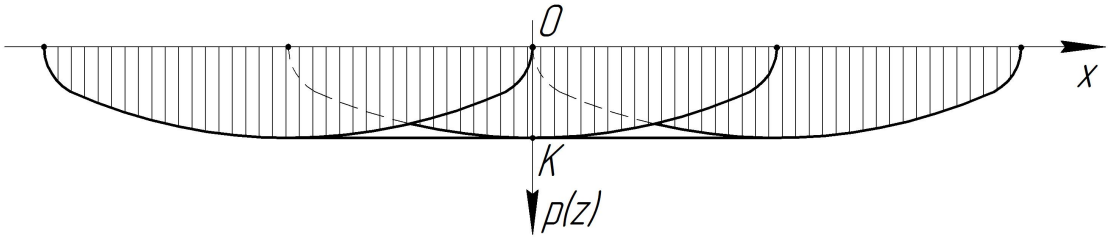


Рисунок 8 – Схема розподілу питомого тиску після проходу кулачкової частини котка
Джерело: розроблено авторами

Якщо брати до уваги, що поверхня самого котка утворена також еліптичною кривою, яка має значно більші розміри, ніж для кулачка, то можна стверджувати, що характер розподілення питомого тиску в зоні контакту буде аналогічним результатам, отриманим вище.

В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що характер розподілення напружень під запропонованим прикочуючим котком з робочими елеменами кулачкового типу відповідає агровимогам щодо ущільнення ґрунту під більшість зернових культур та має суцільний по ширині захвату характер. Але для визначення раціональних значень конструктивних параметрів удосконаленого котка потрібні додаткові експериментальні дослідження за допомогою імітаційного моделювання та методів планування експерименту.

Висновки:

1. Проведений аналіз роботи сучасних прикочуючих котків, які використовуються для передпосівного обробітку ґрунту, встановлено, що їх конструкції не в повній мірі відповідають вимогам до формування необхідної щільності

ґрунту по ширині і глибині захвату, тому нами була запропонована нова конструкція прикочуючого котка з кулачковими робочими елементами та розроблена математична модель його роботи.

2. Запропонована математична модель процесу роботи удосконаленого котка дозволяє встановити характер розподілення питомого тиску в залежності від конструктивних параметрів елементів котка і фізико-механічних властивостей ґрунту.

3. Ефективність запропонованої конструкції прикочуючого котка забезпечується тим, що за рахунок конструкції робочої поверхні та кулачків можна отримати рівномірне ущільнення ґрунту по ширині захвату котка і на потрібну глибину та зменшення кількості проходів котка для забезпечення необхідної рівномірності ущільнення.

Список літератури

1. Маслійов С.В., Шевченко А.М., Маслійов Є.С. Вплив обробітку ґрунту на ріст, розвиток та урожайність розлусної кукурудзи. *Таврійський науковий вісник.* № 116, ч. 2, Землеробство, рослинництво, овочівництво та баштанництво, 2020. С. 14–21. URL: http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/116_2020/part_2/5.pdf (дата звернення: 17.10.2023)
2. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. Машини сільськогосподарського виробництва. Тернопіль:, 2005. 228 с.
3. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник / Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К. : Вища освіта, 2005. С.120-123.
4. Землеробство : підручник / В.П. Гудзь, І.Д. Примак, Ю.В. Будьонний, С.П. Танчик. К. : Центр учб. л-ри, 2010. 464 с.
5. Kuhn 4400 packer. URL: https://www.kuhn.com/en/crop/tillage-implements/packers/4400-packer
6. Amazone - Rollers & Harrows. URL: https://www.amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/cultivation/compact-disc-harrows/52222-52222/52256 (дата звернення: 18.10.2023)
7. Horsch Maschinen - Cruiser XL. URL: https://www.horsch.com/en/products/soil-cultivation/cultivators/cruiser-xl (дата звернення: 1810.2023)
8. Bednar – Котки. URL: https://www.bednar.com/uk/%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%96%D1%82%D0%BE%D0%BA-%D2%91%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D1%83/ (дата звернення: 18.10.2023)
9. Farmet, Kompaktomat NS – Котки. URL:https://www.farmet.cz/uk/seedbed-combinator-kompaktomat-ns (дата звернення: 1810.2023)
10. Шустік Л., Степченко С., Нілова Н., Сидоренко С. Порівняльний аналіз прикочувальних котків різних конструкцій виробництва ТОВ «Ропа-Україна» та експертне оцінювання їхньої дії на ґрунт. *Сільськогосподарська техніка та обладнання: прогнозування, конструювання, випробування.* 2019. Вип. 25(39). С. 89-95. URL: http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-2-25(39)-9 (дата звернення: 19.10.2023)
11. Іванюта М.В. Числове дослідження процесу взаємодії поверхні гладкого котка з ґрунтом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2015. № 5. С. 128-133. URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/780/779/779 (дата звернення: 21.10.2023)
12. Артеменко Д.Ю., Настоящий В.А. Обґрунтування робочої поверхні конусного прикочуючого котка просапної сівалки. *Scientific Journal «ScienceRise».* 2017. №5/2(34). С. 18-22. URL: http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/101960 (дата звернення: 21.10.2023)
13. Шустік Л., Погорілий В., Нілова Н. та ін. Кільчасто-шпорові і зубчато-шпорові котки. Функційні та динамічні випробування. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України.* 2021. Вип. 28 (42). С. 86–101. URL: http://tta.org.ua/article/view/236557 (дата звернення: 22.10.2023)
14. Степченко С. Коткування як один із способів основного обробітку ґрунту. *Техніка і технології АПК.* 2010. № 5(8). С. 15–19. URL: http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/TiTAPK/2010_5/5_10_s15.pdf (дата звернення: 22.10.2023)
15. Рожков П.М. Дослідження процесу взаємодії гладких котків з ґрунтом і обґрунтування їх форми : дис. … канд. техн. наук: 05.20.01. Мелітополь, 1975. 161 с.
16. Кушнарьов А.С., Кочев В.І. Механіко-технологічні основи обробітку ґрунту. К.: Урожай, 1989. 144 с.

17. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Кн. 1 : Машини для рільництва. К. : Урожай, 2001. 384 с.
18. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1, Ч. 2. Машини для сівби та садіння. Харків: Око, 2002. 452 с.
19. Ущільнюючий коток : пат. № 108147 U Україна, E01C19/28 / Артеменко Д.Ю., Настоящий В.А., Антонюк О.М. (Україна); заявник і патентовласник КНТУ. № 201511733; Заявл. 27.11.2015; Опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13. 3 с.

Referencis

1. Masliiov, S.V., Shevchenko, A.M. & Masliiov, Ye.S. (2020). Vplyv obrobitku gruntu na rist, rozvytok ta urozhainist rozlusnoi kukurudzy [The influence of tillage on the growth, development and productivity of open corn.]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk – Taurian Scientific Bulletin*. *№ 116, Part 2,* 14 – 21 , Zemlerobstvo, roslynnytstvo, ovochivnytstvo ta bashtannytstvo. Retrieved from http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/116_2020/part_2/5.pdf [in Ukrainian].
2. Hevko, R.B., Tkachenko I.H. & Pavkh, I.I. (2005). *Mashyny silskohospodarskoho vyrobnytstva* [*Agricultural machines*] . Ternopil [in Ukrainian].
3. Voitiuk, D.H. Baranovskyi, V.M. Bulhakov V.M. et al. (2005). Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural machines. Basics of theory and calculation] D. H. Voitiuka (Eds.). Kyiv: Vyshcha osvita [in Ukrainian].
4. Hudz, V.P., Prymak, I.D,. Budonnyi, Yu.V. & Tanchyk, S.P. (2010). *Zemlerobstvo* [*Agriculture*]. Kyiv : Tsentr uchb. l-ry [in Ukrainian].
5. Kuhn 4400 packer. *kuhn.com.* Retrieved from https://www.kuhn.com/en/crop/tillage-implements/packers/4400-packer [in English].
6. Amazone - Rollers & Harrows. *amazone.net.* Retrieved from https://www.amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/cultivation/compact-disc-harrows/52222-52222/52256 [in English].
7. Horsch Maschinen - Cruiser XL. *horsch.com.* Retrieved from https://www.horsch.com/en/products/soil-cultivation/cultivators/cruiser-xl [in English].
8. Bednar – Rollers. *bednar.com.* Retrieved from https://www.bednar.com/uk/%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%96%D1%82%D0%BE%D0%BA-%D2%91%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D1%83/ [in English].
9. Farmet, Kompaktomat NS – Rollers. *farmet.cz.* Retrieved from https://www.farmet.cz/uk/seedbed-combinator-kompaktomat-ns
10. Shustik, L., Stepchenko, S., Nilova, N. & Sydorenko, S. (2019). Porivnialnyi analiz prykochuvalnykh kotkiv riznykh konstruktsii vyrobnytstva tov «Ropa-Ukraina» ta ekspertne otsiniuvannia yikhnoi dii na grunt [Comparative analysis of rolling rollers of various designs manufactured by Ropa-Ukraine Co., Ltd. and expert assessment of their effect on the soil.]. *Silskohospodarska tekhnika ta obladnannia: prohnozuvannia, konstruiuvannia, vyprobuvannia – Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing, Vol. 25(39*), 89-95. Retrieved from http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-2-25(39)-9 [in Ukrainian].
11. Ivaniuta M.V. (2015). Chyslove doslidzhennia protsesu vzaiemodii poverkhni hladkoho kotka z gruntom [Numerical study of the process of interaction between the surface of a smooth roller and the soil]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, № 5*, 128-133. URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/780/779/779 [in Ukrainian].
12. Artemenko, D.Yu. & Nastoiashchyi, V.A. (2017). Obgruntuvannia robochoi poverkhni konusnoho prykochuiuchoho kotka prosapnoi sivalky [Justification of the working surface of the conical rolling roller of the row drill]. *Scientific Journal «ScienceRise», №5/2(34),* 18-22. Retrieved from http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/101960 [in Ukrainian].
13. Shustik, L., Pohorilyi, V., Nilova, N. et al. (2021). Kilchasto-shporovi i zubchato-shporovi kotky. Funktsiini ta dynamichni vyprobuvannia [Ring-spur and toothed-spur rollers. Functional and dynamic tests]. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy – Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine, Vol. 28 (42),* 86 – 101. Retrieved from http://tta.org.ua/article/view/236557 [in Ukrainian].
14. Stepchenko, S. (2010). Kotkuvannia yak odyn iz sposobiv osnovnoho obrobitku gruntu [Rolling as one of the main methods of tillage]. *Tekhnika i tekhnolohii APK – Agricultural machinery and technologies, № 5(8)*, 15 – 19 Retrieved from http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/TiTAPK/2010_5/5_10_s15.pdf [in Ukrainian].

15. Rozhkov, P.M. (1975). Doslidzhennia protsesu vzaiemodii hladkykh kotkiv z gruntom i obgruntuvannia yikh formy [Study of the process of interaction of smooth rollers with the soil and justification of their shape]. *Candidate's thesis.* Melitopol [in Russian].
16. Kushnarov, A.S. & Kochev, V.I. (1989). *Mekhaniko – tekhnolohichni osnovy obrobitku gruntu* [*Mechanics - technological basics of tillage*] . Kyiv: Urozhai [in Russian].
17. Sysolin, P.V. Salo, V.M. & Nettle, V.M. (2001). *Silskogospodarski mashini: teoretichni osnovi, konstruktsiya, proektuvannya, Kn. 1: Mashini dlya rilnitstva* [*Agricultural machines: theoretical foundations, construction, design, Book. 1: Machines for agriculture*] . Kyiv: Harvest [in Ukrainian].
18. Zaika P.M. (2002).Teoriya silskogospodarskih mashin [Theory of agricultural machines]. *Mashini dlya sivbi ta sadinnya – Machines for sowing and planting ,Vol. 1, part 2,* 452. Kharkiv: Oko [in Ukrainian].
19. Pat. № 108147 U Ukraina, E01S19/28 . Ushchilniuiuchyi kotok [Sealing roller]: / Artemenko D.Yu., Nastoiashchyi V.A., Antoniuk O.M. (Ukraina); zaiavnyk i patentovlasnyk KNTU. № 201511733; Zaiavl. 27.11.2015; Opubl. 11.07.2016, Biul. № 13. 3 [in Ukrainian].

Dmytro Artemenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Onopa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Kyslun,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kostiantyn Mulenko,** magistr
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Substantiation of the Design Features of the Roller for Pre-sowing Tillage

The article presents the results of exploratory theoretical studies of the design features of a roller for pre-sowing tillage. According to the number of operations, the rolling roller can be considered as one of the main means for ensuring high-quality preparation of the field for sowing. Therefore, the rolling process must be considered as a complex of operations, and its construction as a combination of the latter. The technological process of rolling helps to optimally place the seeds at a given depth, improves the contact between the seeds and the soil, and contributes to the rapid swelling and germination of the seeds. The main purpose of rolling is to conserve soil moisture, especially in arid conditions, by reducing physical evaporation.

The analysis of the existing designs of domestic and foreign manufacturers of rolling rollers for pre-sowing soil cultivation and the technological process they perform showed that today the range of designs is growing, versatility is decreasing, each type of work requires its own roller, continuous formation of the compacted bottom of the seedbed with modern rollers in is not fully implemented. The main direction on which foreign roller manufacturers are working is strip rolling and preparation of the seed bed directly along the track of the coulters if the roller is part of the seeding unit. In addition to the classic ones, there are practically no cats for continuous rolling in the company's assortment.

It has been established that the technological process will be more rational when rolling occurs not only in the upper layers of the soil, but also in the lower ones. For this purpose, a combined rolling roller with working elements of the cam type was proposed. A mathematical model of the interaction of the rolling roller and its elements with the soil has been developed. The proposed mathematical model of the working process of the improved roller allows to establish the nature of the specific pressure distribution depending on the constructive parameters of the roller elements and the physical and mechanical properties of the soil. The effectiveness of the proposed design of the rolling roller is ensured by the fact that due to the design of the working surface and cams, it is possible to ensure uniform compaction of the soil along the width of the grip of the roller and to the required depth and reduce the number of passes of the roller to ensure the necessary uniformity of compaction.

favorable conditions for germination, design of rolling roller, soil compaction, combined rolling roller

Одержано (Received) 02.12.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 15.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.33.02 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.16-22

М.Л. Заєць, доц., канд. техн. наук
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна
e-mail: mzaec81@gmail.com

Вплив параметрів дискових сошників на передавальну здатність прорізання пожнивних решток у системі нульового обробітку ґрунту

Впровадження технології сівби з мінімальним або нульовим обробітком ґрунту має низку економічних та екологічних переваг, такі як покращення властивостей ґрунту, зменшення ерозії та деградації ґрунту та економія робочого часу та палива. Теоретичні дослідження обґрунтовують залежність діаметра дискового сошника на глибину проникнення диска, глибину шару рослинних решток і кут стиснення.

Експериментальними дослідженнями встановлено, різні форми та типи дискових сошників діаметром 380 мм найкраще прорізали солому озимої пшениці з природною вологістю (W=10,1 %) та польовою вологістю (W=22,3 %). Дослідженнями підтверджено обмеження обертання активного дискового сошника на підвищених швидкостях (коефіцієнт швидкостей λ>1,37 та λ=1,58) призводить до зростання кількості подрібненої соломи, у порівнянні з пасивним обертанням дискового сошника в контакті з ґрунтом (λ=1,0). Зубчасті дискові сошники зрізують більше соломи, ніж гладенькі дискові сошники. Встановлено залежність прорізання соломи від її вологості.

дисковий сошник, коефіцієнт швидкості, пожнивні рештки, no-till; розподіл соломи

Постановка проблеми. Основною проблемою сьогодення для аграріїв, які займаються технологіями No-till, Strip-till або Mini-till,єдотриманні глибини заробки насіння сошниками посівних машин[1]. Даний параметр – один із важливих критеріїв, який впливає на врожайність сільськогосподарської культури. Якіфактори потрібно враховувати при налаштуванні глибини заробки насіння? Перший фактор – вологість ґрунту, та розміри насіння.Тобто, чим більші розміри насінини, то на більшу глибину їх можна закладати. Це пов'язано з тим, що у великому насінні, більше запасу поживних речовин для появи сходів у порівнянні з дрібним насінням і йому потрібно менша кількість вологи. Другий фактор – агротехнічні строки сівби, чим раніше проводимо процес, то менша глибина заробки, припізній сівбі, необхідно збільшувати допустимуглибину заробки[2,]. Але постає завдання наступного характеру, це нерівномірно роподілені пожнивні рештки у вигляді соломи та стеблово частини рослин, що лишаються на поверхні поля. Тобто, вибір робочої глибини заробки насіння це не єдина проблема, необхідно подолати ще ряд багатофакторних задач, основними факторами, якої є перешкода у вигляді решток,що створюють опір проникненню сошникам до бажаної оптимальної глибини. Тому обгрунтування параметрів дискових сошників є досить актуальною задачею, при застосуванні їх у системі нульового обробітку ґрунту[4,5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями встановлено, що кількість посівів зернових та інших культур або оброблювані ґрунти в Європі та й в Україні швидко зростає [1,2,3]. Порівняно зі звичайним обробітком ґрунту та технологіями сівби, технології No-till, або з мінімальним обробітком ґрунту, вимагають

© М.Л. Заєць, 2023

меншої кількості робочого часу та витрати палива (TebrьggeandBцhrnsen, 2000; Linke, 2006; Sarauskisetal., 2009;Sarauskisetal., 2010) [6,7,8,9]. Підвищується ефективність сівби в необроблені ґрунти, за рахунок структурної стійкості ґрунту, збільшує кількість ґрунтової фауни, зберігає вологість ґрунту, зменшує ущільнення ґрунту (Linke, 1998; Romaneckasetal., 2010) [10,11], і покращується стійкість ґрунту до вітрової та водної ерозії (Chenet al.,2004; VanOostetal., 2009) [12,13]. Дощ, вітер і спосіб обробітку ґрунту має найсильніший вплив на ерозію ґрунту (Tiessenetal., 2010)[14].

Дослідники констатують, що при інтенсивному механізованому обробку ґрунту ведення господарства, ерозія ґрунту може бути в 3-10 разів вищою, ніж при немеханізованому обробітку (VanOostetal., 2009) [13]. За даними, наведеними в науковій літературі, середня ерозія ґрунтів в Україні становить приблизно 10 000 га на рік, із загальною ерозією приблизно від 300–400 до 500–600 млн. т ґрунту на рік (Зубець, 2023). Хоча, системи мінімального або нульового обробітку та рослинні залишки на поверхні ґрунту захищають ґрунт від ерозії та деградації, але вони також ускладнюють процес сівби. Якість заробки насіння суттєво залежить від кількості, ступеню подрібнення, довжини та рівномірності розподілу рослинних решток на поверхні поля. Автори (Linke, 1998; Doanetal., 2005)[10,14], досліджували взаємодію між швидкістю обробітку ґрунту та довжиною соломи в ґрунті та виявили, що довші пожнивні рештки соломи, гірше підаються заробці ніж коротші, при однаковій швидкості обробітку ґрунту.

У посівних машинах для прямої сівби, зазвичай, застосовуються сошники з діаметром дисків 300...500 мм. Отримані результати досліджень взаємодії дискових сошників з рослинними рештками та ґрунтом при застосуванні дискових сошників з діаметром 360...762 мм. Kushwahaetal. (1986) [15] досліджували прорізання рослинних решток гладенькими дисковими сошниками діаметром 360, 460 і 600 мм в ґрунтових умовах No-till. Hemmatetal. (2008)[16] застосовували дисковий сошник з діаметром 762 мм для дослідження механічного опору ґрунту в різних орних і неорних ділянках. FallahiandRaoufat (2008) [17] зосередили увагу на дослідженні взаємодії рослинних залишків, ґрунту та диска сошника діаметром 470 мм. Karayel (2009) [18] використовував експериментальних дискові сошники діаметром 400 і 450 мм, досліджуючи сівбу насіння кукурудзи та сої на ґрунтахбезобробітку.

Постановка завдання. Враховуючи те, що процес сівби без попередньої підготовки поверхні поля та заробки пожнивних стеблових решток носить випадковий характер, у відповідності до вибору робочої глибини заробки насіння, що не єдина проблема, необхідно подолати ще ряд багатофакторних задач, основними факторами, якої є перешкода у вигляді решток,що створюють опір проникненню сошникам до бажаної оптимальної глибини. З метою встановлення закономірностейпо обгрунтуванню параметрів дискових сошників,є досить актуальною задачею, при застосуванні їх в у системі нульового обробітку грунту.

Матеріали та методидослідження. Зрізання соломи озимої пшениці активними дисковими сошниками досліджено в умовах господарства СТОВ «Старокотельнянське» Житомирського району. Дослідження проводились в природно-кліматичних умовах на суглинистих ґрунтах на глибину до 35 мм. Вологість ґрунту становила 12,9±0,4 %, твердість ґрунту 0,5±0,01 МПа, що визначено електронним пенетрометром WALCOM FM-204TR.

Для дослідження були використані природно та штучно зволожена солома озимої пшениці, вологість становила (W=10,1±0,2%). Її збирали з поверхні ґрунту безпосередньо перед початком експериментальних досліджень. Деякі зразки природно зволоженої соломи були замочені у воді на 24 год. Мокру солому виймали з води за

годину до випробувань і розподіляли по поверхня ґрунту для природного висихання. Під час досліджень вологість соломи озимої пшениці становила W=22,3±0,5%. У дослідженні застосовували дискові сошники чотирьох різних форм різальної крайки. Експериментальними дослідженнями встановлено, що чотири різні форми дискових сошників з діаметром 380 мм, які мали наступні параметри дисків: гладка – з кількістю насічок n=0, радіус насічок – r = 0, глибина насічок – Δr = 0 мм; зубчастий – n = 12, r = 15 мм, Δr =15 мм; зубчастий – n = 18, r = 10 мм, Δr =20 мм; зубчастий – n = 18, r= 10 мм, Δr = 10 мм. Вибір саме цих параметрів дискового сошника дозволяє порівняти отримані результати різання соломи з результатами різання для пасивних, одно- та дво-дискових сошників, з раніше отриманими результатами. Сошники були по черзі розташовані на сівалці та приводились до обертового руху ланцюговою передачею, з'єднаної з опорно-приводним колесом (діаметром 680 мм). Ковзання колеса по поверхні ґрунту істотно не впливає на швидкість обертання дискових сошників. Використовувалися зірочки з різною кількістю зубів, що дозволяло змінити передачу і, відповідно, швидкісний коефіцієнт λ дискового сошника.

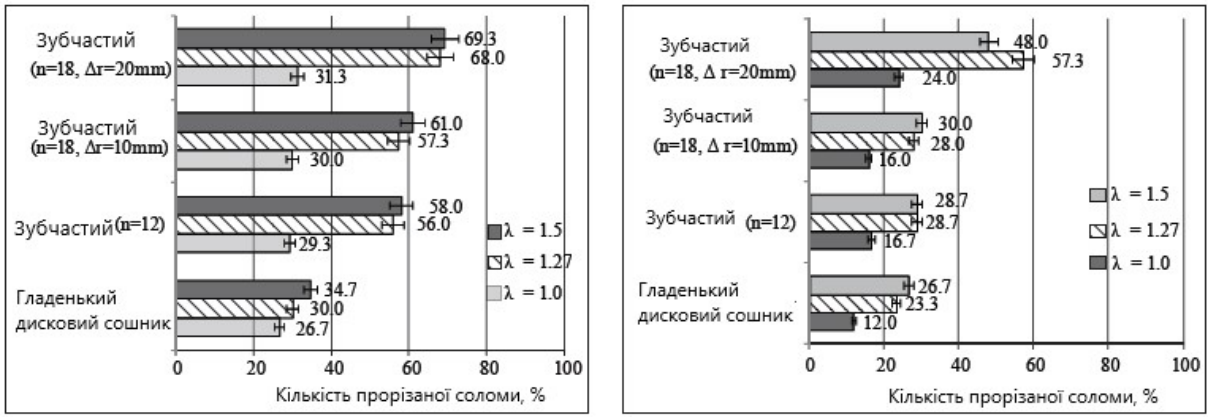
Середні довжини розподіленої соломи озимої пшениці та ярого ячменю становили 330±10 мм і 353±10 мм відповідно. Солома була окремо розкладена у п'ять рядків довжиною 0,5 м, по 100 соломинок у кожній лінії. Середня швидкість руху досліджуваних зразків з дисковими сошниками становила 7 км/год, а рух сошників відбувався перпендикулярно розміщеній соломі. Глибина занурення дискового сошника в ґрунт становило 35 мм, оскільки на цю глибину закладають насіння основних зернових культур.

Дослідження процесу перерізання природно зволоженої і зволоженої соломи обох видів рослин проводили п'ять разів. Аналогічні дослідження були проведені з різними дисками з коефіцієнтом швидкості сошника (λ=1,0, λ=1,37 і λ=1,58). Після перекочування по розподіленій соломі, скошеній і нескошеній, активними дисковими сошниками рахували ефективність різання соломи. Активними сошниками з різною кількістю зубів на різальній крайці, оцінювали на основі кількості перерізаних соломин. Найкращі результати різання соломи за даною методикою були отриманні з активним однодисковим зубчастим сошником (18 зубців, Δr=20 мм). Наступне експериментальне дослідження зосередили на впливі коефіцієнта швидкості активного однодискового сошника з зубцями та коефіцієнта λ на ефективність прорізання соломи. У досліді були використані наступні значення коефіцієнта швидкостей λ, що становили: 1,0, 1,1, 1,27, 1,37, 1,42, 1,5 і 1,58, а глибина закладання насіння дискового сошника становила 35 мм.

Виклад основного матеріалу.Дослідженнями різання соломи озимої пшениці диском сошників встановлено, що всі пасивні дискові сошники при коефіцієнті швидкості руху (λ=1,0) зменшують приблизно до 30% (рис. 1,*а*) природню вологість (W=10,1 %) соломи пшениці озимої. Істотних відмінностей між різними за діаметром дисковими сошниками не спостерігалось. Кількість соломи, прорізаної за допомогою зубчастих активних дискових сошників (передавальні числа λ>1,37 та λ=1,58) на (26,7–38,0) % зростає, у порівнянні з пасивним дисковим сошником. Найбільша кількість природної вологи затримує солома пшениці (69,3±7,6%), зрізана активним дисковим сошником з 18 насічками (Δr=20 мм).

Різниця між цим диском сошника та іншими, які використані у дослідженнях, була досить суттєвою. Експериментальним дослідженням різання соломи озимої пшениці вологістю (W=22,3±0,5%) встановлено, що активний дисковий сошник на 18 зубців (Δr=20 мм) оптимальний для різання штучно зволоженої соломи. На активному диску з насічками коефіцієнт швидкості сошника становить λ=1,27, диски зрізають

57,3% вологої соломи озимої пшениці (рис. 1,*б*). Інші три активні гладкі та зубчасті дискові сошники зрізають меншу кількість соломи озимої пшениці. Кількість вологої соломи, прорізаної пасивними дисковими сошниками при коефіцієнті швидкості (λ=1,0), незалежно від кількості насічок на різальній крайці, на 12-24% нижча, ніж виконана за допомогою зубчастих активних дискових сошників. Гладкий дисковий сошник прорізає найбільше до 12% кількості соломи, а різниця між гладкими та зубчастими дисковими сошниками є значною.

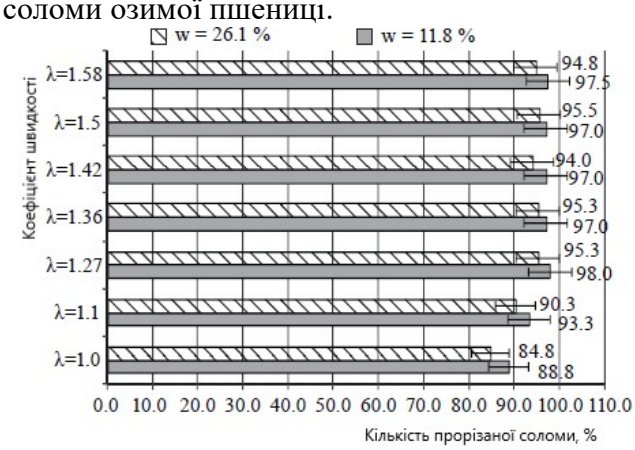


а) *б*)

$P_{0,05}$ (λ=1,0)=4,6%; $P_{0.05}$ (λ=1,27)=6,1 %; $P_{0,.05}$ (λ=1.5)=7.5% $P_{0,05}$(λ=1,0)=3,9 %; $P_{0.05}$ (λ=1,27)=7,8%; $P_{0,05}$(λ=1,5)=8,2 %

Рисунок 1 – Вплив форми однодискового сошника, коефіцієнта швидкостей λ та вологості соломи на зрізання соломи пшениці озимої: *а*) природна вологість соломи (W=10,1 %); *б*) волога солома (W=22,3 %)
Джерело: розроблено автором

Пасивний дисковий сошник з передаточним числом λ=1,0 зрізає найменшу кількість решток (84,8–88,8%) за природної вологості (W_1=11,8 %) та вологої (W_2=26,1 %.) соломи озимої пшениці (рис. 2.). Активний дисковий сошник прорізає солому з природною вологістю і вологу, більш ефективно з коефіцієнтами швидкості λ=1,37 та λ=1,57 відповідно. Встановлено, що зміна швидкісного коефіцієнта обертання дискового сошника від λ=1,1 до λ=1,58 суттєво не впливає на різання соломи природної вологості та вологої соломи озимої пшениці.



$P_{0,05}$ (W_1) = 3,1 %; P0,05 (W_2) = 3,9 %; $P_{0,05}$ (W_1,W_2) = 3,4 %

Рисунок 1 –Вплив однодискового сошника (18 зубів, Δr=20 мм) коефіцієнт швидкості λ на різання соломи озимої пшениці природної вологості (W_1=11,8 %) та з вологістю (W_2=26,1 %)
Джерело: розроблено автором

Під час додаткових експериментальних досліджень встановлено суттєве збільшення кількості соломи озимої пшениці, що зрізається за рахунок природніх умов досліду, оскільки опір заглиблення сошника в ґрунт, в цих дослідах, приблизно в 2 рази більший (на глибині 35 мм –(1,0±0,02)МПа), ніж у попередніх дослідженнях. Дослідники (Linke, 1998) [10], стверджують, що між твердістю ґрунту та опором різання соломи існує залежність, що потребує виконання аналогічних досліджень. Встановлено, що зі зростанням твердості ґрунту, покращується зрізання рослинних залишків. Спостерігалось, коли дисковий сошник проникає в ґрунт на глибину до 35 мм, деякі частинки соломи залишаються нерозрізаними, тому з метою збільшення кількості розрізаних рослинних решток, глибина проникнення дискового сошника має бути збільшена на 20…25 %.

Попередні дослідження проводились в Житомирському районі на базі господарства СТОВ «Старокотельнянське». Встановили, що збільшення глибини проникнення диска від 20…35 мм покращує прорізання соломи озимої пшениці на 7–18 %. Визначили, що в ґрунті пасивні гладенькі дискові сошники діаметром 460 мм, що рухаються зі швидкістю 6,4 км/год, зрізають 100 % рослинних залишків (2000 кг/га) при проникненні на глибину до 50 мм.

Висновки. Примусове обертання зубчастого дискового сошника (коефіцієнт швидкостей $\lambda>1,37$ та $\lambda=1,58$) у необробленому ґрунті (вологість (12,9±0,4) %, твердість 0,5 МПа, глибина проникнення диска до 35 мм), забезпечує (56,0–69,3) % перерізання соломи озимої пшениці природної вологості (W=10,1 %); що значно більше, ніж отримані значення при вільному переміщенні дискового зубчастого сошника при ($\lambda=1,0$). У разі примусового обертання, гладкий дисковий сошник зрізає значно більше соломи, ніж коли він рухається вільно. Однак, це збільшення для розрізу соломи та решток є менш значним для дискових зубчастих сошників. У всіх випадках суха солома розрізається краще ніж волога солома. Зміна коефіцієнта швидкості зубчастих дискових сошників (n=18, Δr=20 мм) від $\lambda=1,1$ до $\lambda=1,58$ не істотно впливає на різання соломи озимої пшениці в ґрунті різної вологи без обробки, де твердість ґрунту становить (1,0±0,02)МПа на глибині 35 мм. Однак при умові, що дисковий сошник ($\lambda=1,0$) рухається вільно, кількість розрізаної соломи суттєво нижча, ніж у варіанті примусового обертання дискового сошника.

Список літератури

1. Коряковський А.В., Бакіров Ф.Г. Саморозпушення ґрунту під впливом солом'яної мульчі. *Агрономія та лісове господарство*. 2011. Вип. 22. С. 21-23.
2. Nielsen K, et al. Sustained oscillations in glycolysis: an experimental and theoretical study of chaotic and complex periodic behavior and of quenching of simple oscillations. *Biophys Chem* . 1998. 72 (1-2). P. 49-62.
3. Заєць М. Л. Результати дослідження впливу рівномірності розподілу пожнивних решток на глибину сівби та урожайність сільськогосподарських культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин.* 2021. Вип. 51. С. 36–46.
4. Гевко Б.М., Лящук О.Л., Павельчуктаін Ю.Ф. Технологічні основи проектування і виготовленняпосівнихмашин:монографія . Тернопіль:Вид. ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2013. 238 с.
5. Спосіб визначення якості розподілу сипких матеріалів вздовжрядка: пат. 34019 Україна / П.В. Сисолін, І.М. Осипов, І.П. Сисоліна: МПК A01C 7/00. № u 2008 02025 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.
6. Tebrügge F., Böhrnsen Direktsaat A. Beurteilung durch Landwirte und Experten in der EU und Nebraska. *Landtechnik*. 2000. 1. Pp.17–19.
7. Linke C. Entwicklung der Direktsaat. Landtechnik. 2006. 61. Pp. 312–313.

8. Šarauskis E., Vaiciukevicius E., Romaneckas K., Sakalauskas A., Baranauskaite R. Economic and energetic evaluation of sustainable tillage and cereal sowing technologies in Lithuania. *Rural Development* 2009, Proceedings. 2009. 4 (1). Pp. 280–285
9. Šarauskis E., Godlinski F., Sakalauskas A., Schlegel M., Kanswohl N., Romaneckas K., Jasinskas A. Pilipavičius V. Effects of soil tillage and sowing systems on sugar beet production under the climatic conditions of Lithuania. *Landbauforschung Volkenrode*. 2010. 2 (60). Pp. 101–110.
10. Linke C. Direktsaat – eine Bestandsaufnahme unter besonderer Berьcksichtigung technischer, agronomischer und цkonomischer Aspekte. Dissertation, University of Hohenheim, Stuttgart, 1998. 482 pp.
11. Romaneckas K., Pilipavičius V., Šarauskis E. Impact of seedbed density on sugar beet (Beta vulgaris L.) seed germination, yield and quality of roots. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 2010. 8 (2). Pp. 599–601.
12. Chen Y., Tessier S., Irvine B. Drill and crop performances as affected by different drill configurations for no-till seeding. Soil & Tillage Research. 2004. 77 (2). Pp. 147–155.
13. Van Oost K., Cerdan O., Quine T. A. Accelerated sediment fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2009. 34. Pp. 1625–1634.
14. Doan V., Chen Y., Irvine B. Effect of residue type on the performance of no-till seeder openers. *Canadian Biosystems Engineering*. 2005. 47. Pp. 29–35.
15. Kushwaha R.L., Vaishnav A.S., Zoerb G.C. Soil bin evaluation of disc coulter under no-till crop residue conditions. *Transactions of ASAE*. 1986. 29 . Pp. 40–44.
16. Hemmat A., AdamchukV.I., Jasa P. Use of an instrumented disc coulter for mapping soil mechanical resistance. *Soil & Tillage Research*. 2008. 98. Pp. 150–163.
17. Fallahi S.,Raoufat M.H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: A comparative study. *Soil & Tillage Research*. 2008. 98 . Pp. 27–34.
18. Karayel D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil & Tillage Research*. 2009. 104. Pp. 121–125.

References

1. Koriakovskyi, A.V. & Bakirov, F.H. (2011). Samorozpushennia gruntu pid vplyvom solomianoi mulchi[Self-loosening of the soil under the influence of straw mulch]. *Ahronomiia ta lisove hospodarstvo - Agronomy and forestry, Issue 22*, 21-23 [in Ukrainian].
2. Nielsen, K. et al. (1998). Sustained oscillations in glycolysis: an experimental and theoretical study of chaotic and complex periodic behavior and of quenching of simple oscillations. *Biophys Chem, 72(1-2):*49-62. [in Belgium].
3. Zayets, M.L. (2021). Rezultaty doslidzhennia vplyvu rivnomirnosti rozpodilu pozhnyvnykh reshtok na hlybynu sivby ta urozhainist silskohospodarskykh kultur. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s.-h. mashyn – Design, production and operation of agricultural machines, Issue 51*, 36-46 [in Ukrainian].
4. Hevko, B.M., Liashchuk, O.L., Pavelchuk, Yu.F. et al. (2013). *Tekhnolohichni osnovy proektuvannia ta vyhotovlennia posivnykh mashyn* [*Technological bases of designing and manufacturing of seeding machines*]. Ternopil: TNTU imeni Ivana Puluia [in Ukrainian].
5. Sysolin, P.V., Osypov, I.M. & Sysolina, I.P. (2008). Ukraine Patent No. 34019. Kyiv [in Ukrainian].
6. Tebrügge, F. & Böhrnsen, A. (2000). Direktsaat. Beurteilung durch Landwirte und Experten in der EU und Nebraska. *Landtechnik, 1*, 17–19 [auf Deutsch].
7. Linke, C. (2006). Entwicklung der Direktsaat. *Landtechnik, 61,* 312–313 [in Deutsch].
8. Šarauskis, E., Vaiciukevicius E., Romaneckas K., Sakalauskas, A. & Baranauskaite, R. (2009). Economic and energetic evaluation of sustainable tillage and cereal sowing technologies in Lithuania. *Rural Development 2009, Proceedings, 4 (1),*280–285 [in English].
9. Šarauskis, E., Godlinski, F., Sakalauskas, A., Schlegel, M., Kanswohl, N., Romaneckas, K., Jasinskas, A. & Pilipavičius, V. (2010). Effects of soil tillage and sowing systems on sugar beet production under the climatic conditions of Lithuania. *Landbauforschung Volkenrode, 2 (60),* 101–110 [in English].
10. Linke, C. (1998). Direktsaat – eine Bestandsaufnahme unter besonderer Berьcksichtigung technischer, agronomischer und цkonomischer Aspekte. Dissertation, University of Hohenheim, Stuttgart [in Deutsch].
11. Romaneckas, K., Pilipavičius, V. & Šarauskis, E. (2010). Impact of seedbed density on sugar beet (Beta vulgaris L.) seed germination, yield and quality of roots. *Journal of Food, Agriculture & Environment, 8 (2)*, 599–601. [in English].

12. Chen, Y., Tessier, S. & Irvine, B. (2004). Drill and crop performances as affected by different drill configurations for no-till seeding. *Soil & Tillage Research, 77 (2),* 147–155 [in English].
13. Van Oost, K., Cerdan O. & Quine, T.A. (2009). Accelerated sediment fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms, 34*, 1625–1634 [in English].
14. Doan, V., Chen, Y. & Irvine, B. (2005). Effect of residue type on the performance of no-till seeder openers. *Canadian Biosystems Engineering, 47,* 29–35 [in English].
15. Kushwaha, R.L., Vaishnav, A.S. & Zoerb, G.C. (1986). Soil bin evaluation of disc coulter under no-till crop residue conditions. *Transactions of ASAE, 29* , 40–44 [in English].
16. Hemmat, A., Adamchuk, V.I. & Jasa, P. (2008). Use of an instrumented disc coulter for mapping soil mechanical resistance. *Soil & Tillage Research, 98,* 150–163. [in English].
17. Fallahi, S. & Raoufat, M. H. (2008). Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: A comparative study. *Soil & Tillage Research, 98 ,* 27–34 [in English].
18. Karayel, D. (2009). Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil & Tillage Research, 104,* 121–125 [in English].

Maksym Zayets, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Polissia National University, Zhitomir, Ukraine

Influence of Parameters of Disc Coulters on the Transmission Capacity of Cutting Crop Residues in the System of Zero Tillage

The implementation of no-tillage seeding technology has a number of economic and environmental benefits, such as improved soil properties, reduced erosion and soil degradation, and improved time and fuel efficiency. However, the main disadvantage of these technologies is that plant residues on the surface of the soil reduce the ability of uniform germination of seeds of agricultural crops, which requires the introduction of an additional process of harvesting or cutting plant residues.

Theoretical studies substantiate the dependence of the diameter of a single disc coulter on the working depth of penetration of the disc, the depth of the layer of plant residues and the angle of compression. The use of active and passive coulters, which cut the straw by sliding on the working surface of the field.

Experimental studies have established that the use of four different forms of disc coulters with a diameter of 380 mm (smooth with the number of teeth n=0, groove depth Δr=0 mm; toothed n=12, Δr=15 mm; toothed n=18, Δr=10 mm; toothed n=18, Δr=20 mm), straw with natural moisture (W=10.1%) and wet winter wheat straw with moisture (W=22.3%) were best cut through. Experimental studies have confirmed the restriction of the rotation of the active disc coulter at high speeds (speed coefficient λ>1.37 and λ=1.58), which leads to a greater amount of cut straw, compared to the case of using a disc coulter with passive rotation in contact with the soil (λ=1.0). Serrated disc coulters cut straw and crop residues more efficiently than smooth discs. Studies confirm the dependence of straw cutting ability on the moisture content of the material, where the amount of straw cut through decreases as the moisture content of the material increases.

Forced rotation of a toothed disc coulter (speed coefficient λ>1.37 and λ=1.58) in untreated soil (moisture 12.9±0.4%, hardness 0.5 MPa, disc penetration depth up to 35 mm) provides 56 ,0 – 69.3% cutting of winter wheat straw of natural moisture (W=10.1%); which is significantly greater than the values obtained during free movement of the disk toothed coulter at (λ=1.0).

disc coulter, speed coefficient; harvest residues; no-till; distribution of straw, toothed discs

Одержано (Received) 31.10.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 12.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.358.42 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.23-31

В.М. Булгаков, проф., д-р техн. наук, **О.М. Троханяк,** доц., канд. техн. наук
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна

Дослідження та вдосконалення запобіжних механізмів шнекових конвеєрів

Метою роботи являється підвищення експлуатаційних показників і надійності роботи запобіжної муфти шляхом розроблення нової конструкції запобіжногомеханізму, що дасть змогу створитиу випадку виникнення перевантаження шнека конвеєра широкий діапазон пружного режиму роботи перед запобіжним. Дослідження виконано із використанням методів теорії математичного та комп'ютерного моделювання. методу математичного планування експерименту.
захисні механізми, запобіжна муфта, конструктивно-кінематичні параметри, навантаження, експериментальний стенд, робочі органи

Постановка проблеми. Робочі органи машин, які працюють в широкому діапазоні умов та з матеріалами, які мають різні реологічні властивості, чи не найбільше піддаються впливу зовнішніх навантажень, що переважно носять випадковий характер і можуть досягати критичних значень як для самих робочих органів, так і для їх приводів.Такі критичні навантаження досить часто викликають поломки техніки, на відновлення якої витрачаються значні матеріальні ресурси та час, що негативно впливає на продуктивність та ефективність використання технологічних машин.

В зв'язку з цим, необхідно вдосконалювати та розробляти нові типи захисних механізмів (запобіжних муфт), вибирати оптимальні їх конструктивно-кінематичні параметри та режими роботи, що забезпечить надійність захисту техніки від поломок, знизить динамічні навантаження в процесі буксування півмуфт, а також автоматичне відновлення робочого стану машин після усунення перевантаження.

Аналіз основних досліджень і публікацій.На сьогоднішній час виникає потреба у активному розробленні конструкцій запобіжних муфт, які дозволили б здійснити ефективний захист різних видів машин. Для надійної та більш ефективної роботи гвинтових конвеєрів, таких як жорстких [1, і гнучких [2], розроблені нові конструкції запобіжних муфт. Вони мають можливість осьового відведення заклиненого робочого органу, методика проведення їх експериментальних досліджень показана в роботі [3]. Також при розробленні конструкцій таких запобіжних пристроїв необхідно враховувати і аналіз визначення динамічних навантажень різних видів приводів із запобіжними пристроями, а також їх силових розрахунків [4–6]. Враховувати необхідно також і дослідження із встановлення контактних напружень в елементах зачеплення, які необхідні для підвищення довговічності кулькових запобіжних муфт[7–9]. Також проводились дослідження, які розглядали оптимізацію параметрів і режимів роботи фрикційних муфт [10]. На основі специфіки роботи сільськогосподарської техніки та металообробного обладнання розроблені нові конструкції адаптованих до них запобіжних механізмів [11] та проведено обґрунтування їх оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів.

Постановка завдання. З метою формалізації процесу захисту робочих органів машин від перевантажень необхідно провести розрахунок параметрів запобіжних муфт.

© В.М. Булгаков, О.М. Троханяк, 2023

В даній статті розглянуто захист робочих органів машин з обертовим та осьовим, а також виключно з обертовим процесом функціонування робочих органів машин.

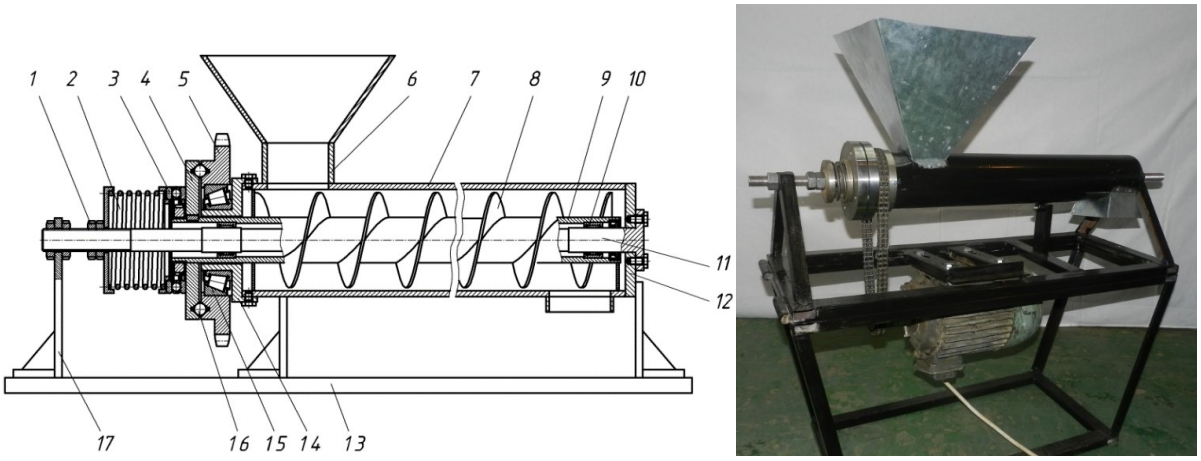
Виклад основного матеріалу. На рис. 1 зображена схема гвинтового конвеєра із запобіжною муфтою.

В процесі роботи сипкий матеріал через бункер потрапляє в корпус на гвинтовий живильник, який транспортує його в напрямку вивантаження. При попаданні твердого тіла у площину між поверхнею обертання шнека та внутрішньою поверхнею корпусу конвеєра виникає заклинювання й відповідно зупинка шнека.

Для відновлення робочого стану гвинтового конвеєра запропоновано застосувати запобіжний пристрій із розділеними в часі режимами буксування та осьового зміщення шнека.

Конструктивна схема такої запобіжної муфти та схема роботи показано на рис.2.

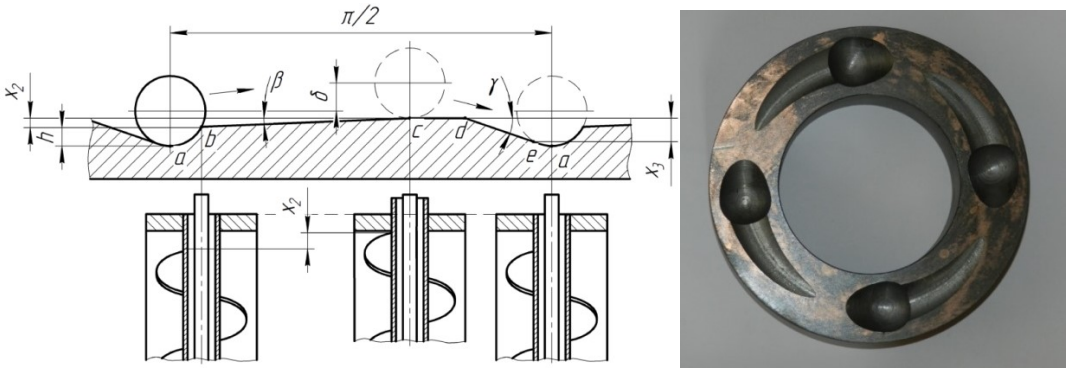
При передачі крутного моменту пальці перебувають у зачепленні із лунками півмуфти ведучої, внаслідок чого виникає обертання запобіжної муфти та гвинтового робочого органу. Півмуфта ведена закріплена на шліцах валу із можливістю осьового зміщення. Між півмуфтою веденою та гайкою виконано зазор δ, значення якого відповідно рівне запобіжному режиму муфти.



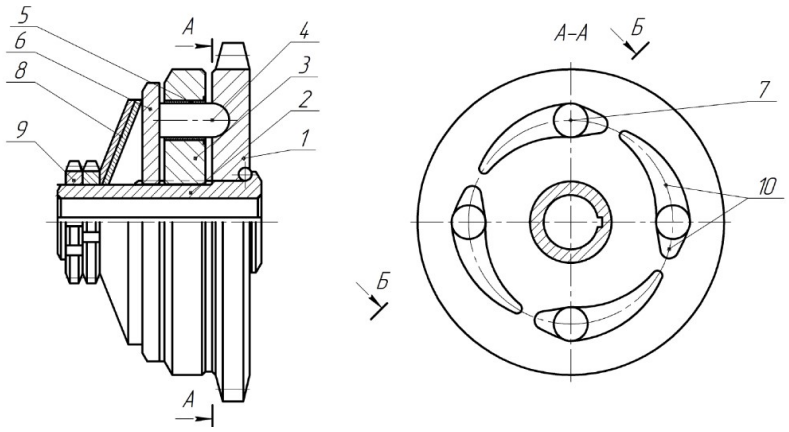
1 – гайка; 2 – пружний елемент; 3 – підшипник упорний; 4 –півмуфта ведена; 5 –півмуфта ведуча; 6 – бункер;7 – корпус; 8 – гвинтовий живильник; 9 – труба (вал гвинтового живильника); 10 – голчастий підшипник; 11 – суцільний вал; 12 – правий фланець; 13 – рама; 14 – лівий фланець; 15 – радіально-упорний підшипник; 16 – кульки; 17 – стійка

Рисунок 1 – Гвинтовий конвеєр із запобіжною муфтою

Джерело: розроблено авторами



а б



в

Рисунок 2 – Схема роботи запобіжного пристрою (а) загальний вигляд півмуфти (б) і конструктивна схема запобіжної муфти (в)

Джерело: розроблено авторами

По діаметру розміщення пальців та лунок з обох боків лунок на торцевій поверхні півмуфти ведучої виконані похилі робочі та зворотні канавки, причому кут нахилу робочої канавки β є значно меншим кута нахилу зворотної канавки γ.

Під час виникнення перевантаження півмуфта ведена зупиняється, а ведуча, відповідно, продовжує обертатися, це в свою чергу викликає вихід пальців із зачеплення з лунками. Внаслідок того, що пальці заокругленою частиною здійснюють рух по робочій канавці, тобто виникає плавне осьове відведення заклиненого робочого органу конвеєра. Внаслідок подальшого обертання півмуфти ведучої кульки по зворотній канавці закочуються у лунки, відновлюючи при цьому початковий стан муфти.

Під час виникнення заклинення робочого органу відбувається основне розчеплення півмуфт, тобто виконується вихід пальців із лунок на глибину лунки h по лінії ab, а це в свою чергу викликає розмикання кінематичного ланцюга приводу. Далі кульки рухаються по похилих робочих канавках (із кутом нахилу β) півмуфти веденої (лінія bc), отже, так і забезпечується плавне осьове відведення шнека на максимальну величину x_2. Це призводить до суттєвого зменшення динамічного навантаження на привід конвеєра. Внаслідок того, що півмуфта ведуча продовжує обертатися, то пальці заходять в початкове положення, здійснюючи при цьому рух по похилих зворотних канавках із кутом нахилу γ на торцевій поверхні півмуфти веденої (лінія de), тобто виконується переміщення робочого органу на величину x_3, і отже відбувається плавне відновлення робочого стану гвинтового конвеєра.

З метою проведення аналізу зміни величини крутного моменту в залежності від провертання півмуфт запобіжного механізму на різних етапах його спрацювання, виконаний силовий розрахунок.

Розглянемо на першому етапі зачеплення заокруглених пальців із лунками півмуфти ведучої (рис. 2).

На цьому етапі початковий T_{1o} і максимальний $T_{1\max}$ крутні моменти визначаються за формулою

$$T_{1o} = T_{1\max} = \frac{Rc\delta_0}{\dfrac{r-h-tg\varphi\sqrt{r^2-(r-h)^2}}{\sqrt{r^2-(r-h)^2}+(r-h)tg\varphi}}, \quad (1)$$

де R– радіус розміщення пальців;

c – жорсткість пружини;

δ_0 – попередній натяг пружини;

r – радіус заокруглення пальця;

h – максимальна величина переміщення пальця по поверхні лунки;

φ – кут тертя.

Розглянемо другий етап роботи муфти. На цьому етапі пальці разом із півмуфтою веденою переміщаються по похилій робочій канавці півмуфти ведучої, а це і викликає осьове відведення перевантаженого робочого органа (рис.1, б). При цьому початковий T_{2o} і максимальний $T_{2\max}$ крутні моменти визначаються за залежністю

$$T_{2o} = T_{2\max} = \frac{cR(\delta_0 + h + x_1)}{tg(90^\circ - \beta - \varphi)}, \quad (2)$$

де x_1 – біжуча величина виходу кульки із робочої канавки.

Розглянемо третій етап роботи муфти. На цьому етапі пальці із півмуфтою веденою переміщуються по похилих плоских поверхнях півмуфти ведучої у напрямку лунок, що призводить до відновлення початкового положення всієї системи (рис.1, б). Початковий T_{3o} і максимальний $T_{3\max}$ крутні моменти визначаються за залежністю

$$T_{3o} = T_{3\max} = -\frac{cR(\delta_0 + h - x_2)}{tg(90^\circ - \gamma + \varphi)}, \quad (3)$$

де x_2 – біжуча величина входу пальця в зворотну канавку.

Під час роботи муфти, коли відбувається рух пальців по канавках, утворюється деформація зсуву. Виконаємо перевірку умови міцності пальця на зріз при дії обертового моменту. Вважаємо, що напруження зрізу розподіляться рівномірно по поверхні контакту пальця і канавки, і визначаємо їх за формулою

$$\tau_{зр} = \frac{4F_к}{z\pi d^2} \le [\tau]_{зр}, \quad (4)$$

де $F_к$– колова сила, що діє у зачепленні;

z– кількість пальців;

d– діаметр пальця;

$[\tau_{зр}]$ – допустиме напруження на зріз.

З метою встановлення характеру зміни максимального крутного моменту спрацювання пальцевої запобіжноїмуфти, а також для встановлення адекватності теоретичних досліджень проведено його експериментальні статичні випробування.

З цією метою використовували дослідну машину КМ–50–1. Для проведення досліджень у захватах машини закріплювали півмуфти пальцевого запобіжного пристрою. Загальний вигляд даного стенду, на якому розміщений пальцевий запобіжний механізм, показано на рис. 3.



Рисунок 3 – Загальний вигляд стенду, на якому розміщений пальцевий запобіжний пристрій
Джерело: розроблено авторами

Навантаження на півмуфтуведучу задавали за допомогою обертання нижнього захвату за допомогою електродвигуна через систему передач. Значення крутного моменту визначалось по коловій шкалі, причому, відносне зміщення півмуфтфіксувалось за допомогою кутової шкали. Машина також містить записуючий пристрій, за допомогою якого викреслюється крива залежності обертового моменту від кута повороту нижнього захвату.

Під час проведення досліджень фіксування значення крутних моментів в залежності від кута провертання півмуфтиведучої проводили в десятиразовій повторюваності.

Ґрунтуючись на результатах досліджень, встановлено, що розчеплення півмуфтвиникало при максимальному крутному моменті, причому він значно зменшувався під час виходупальців на похилі робочі канавки півмуфти ведучої. Також під час руху пальців по робочих канавках величина крутного моменту зростала не суттєво. У випадку руху пальців по похилих зворотних канавках виникавпротимомент, проте його значення не перевищувало момент спрацювання пальцевого запобіжного механізму.

На рис. 4 представлена залежність зміни крутного моменту півмуфтиведучої і шнека T від кута відносного провертання півмуфт ρ, в статичному стані при різних кутових положеннях півмуфт при одному циклі спрацювання пальцевої запобіжної муфти.

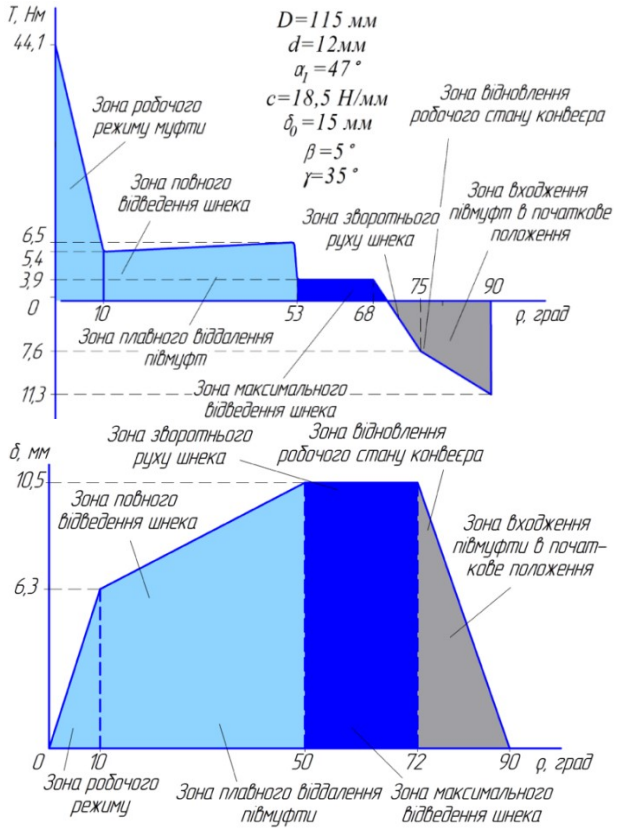
На рис. 5 показані графіки зміни напружень зрізу $\tau_{зр}$ від кількості пальців z та величини діаметра пальців d при коловій силі $F_к$=1000 Н.

Із графіків встановлено, що при збільшенні кількості пальців z напруження зрізу $\tau_{зр}$ зменшується на 87…91 %,і при зростанні величин діаметра пальців d напруження зрізу $\tau_{зр}$спадає на 65…69 %.

Із графіків видно, що максимальне значення напруження зрізу рівне $\tau_{зр}$ = 2,21 МПа.

За третьою теорією міцності допустиме напруження дорівнює

$$[\tau]_{зр} = 0,5 \cdot 340 = 170 \text{ МПа}.$$



а б

Рисунок 4 – Залежність крутного моменту T (а) та осьового переміщення веденої півмуфти δ (б) від зміни кута відносного провертання півмуфтиφ

Джерело: розроблено авторами

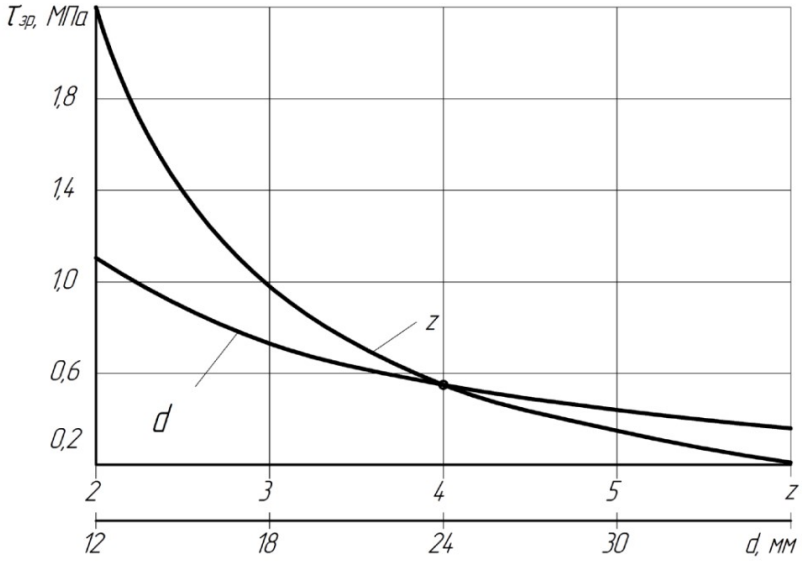


Рисунок 5 – Графічні залежності напружень зрізу $\tau_{зр}$ від кількості пальців z та величини діаметра пальців d при коловій силі $F_к$=1000 Н

Джерело: розроблено авторами

Отже, умова міцності на зріз виконується зі значним коефіцієнтом запасу міцності

$$n_{\tau} = \frac{[\tau]_{зр}}{\tau_{зр}} = \frac{170}{2,21} = 76,92 .$$

У випадку передавання крутного моменту тільки одним пальцем (найгірший теоретичний варіант), матимемо: $\tau_{зртах}$=8,84МПа і n_{τ}=19,23.

Отже, навіть у такому теоретично можливому випадку міцність на зріз пальців муфти забезпечена.

Конструкція такої муфти забезпечує плавний процес відносного провертання півмуфт, виключає ударні навантаження на привід під час буксування муфти, має високий коефіцієнт чутливості та є простою у виготовленні. Проте, крутний момент, який передає муфта, є невисоким і, в основному, залежить від кута нахилу лунок, величини ексцентриситету кільцевих канавок та сили стискання пружини. Тому, з метою передачі максимальних значень крутних моментів, слід забезпечувати максимальну твердість поверхні кільцевих канавок, оскільки контактні напруження у парі кулька-поверхня канавки будуть мати великі значення.

Висновки. В роботі проаналізовано сучасний стан проблеми, котра полягає в зниженні динамічних навантажень на приводи конвеєрів під час виникнення критичних навантажень на їх робочих органах, а також забезпечення надійного захисту машин від поломок. В статті представлено теоретичні та експериментальні дослідження нової конструкцій запобіжного механізму з осьовим відведенням заклиненого шнека для його виведення із зони перевантаження. Описано його будову та принцип роботи.

Представлено теоретичні залежності визначення зміни крутного моменту під час спрацювання пальцевої запобіжної муфти від кута відносного провертання півмуфт та конструктивних й технологічних параметрів елементів зачеплення.

На основі силового, кінетостатичного аналізу муфти встановлено характер і величину зміни їх крутного моменту на всіх етапах відносного провертання півмуфт.

Розроблені та виготовлені дослідні зразки пальцевої запобіжної муфти, щодало змогу провести комплекс експериментальних досліджень. Для запобіжної муфти гвинтового конвеєра на основі аналізу даних теоретичних і експериментальних випробувань виконано порівняння адекватності теоретичних обчислень і реальних значень крутних моментів під час спрацювання механізму. Встановлено, що похибка між результатами досліджень знаходиться в межах 5,5…21,1%.

Також проведено перевірку умови міцності робочого елемента (пальця) запобіжної муфти на зріз при дії обертового моменту, на основі якого встановлено, що навіть у такому теоретично можливому випадку міцність на зріз пальців муфти забезпечена.

Список літератури

1. Hevko R.B., Klendiy O.M. The investigation of the process of a screw conveyer safety device actuation . *INMATEH: Agricultural engineering*. 2014. Vol. 42, no.1. Pp. 55–60.
2. Hevko R.B. Rozum R.I., Klendii O.M. Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors . *INMATEH: Agricultural engineering*. 2016. Vol.50, no.3. Pp.89–94.
3. Гевко Р.Б., Клендій О.М. Методика проведення досліджень шнекового транспортера із запобіжним пристроєм . *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2013. Вип. 24. С. 67–74.
4. Кіндрацький Б.І., Шпак О.О. Динаміка приводу з кульковою запобіжною муфтою, оснащеною блокувальним пристроєм. *Вісник НТУ «ХПІ». Темат. вип. «Машинознавство і САПР»*. 2008. № 14. С.53–65.
5. Hevko R.B., Klendiy M.B., Klendiy O.M. Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyer, *INMATEH: Agricultural engineering*. 2016. Vol.48, no.1. Pp.29–34.
6. Гевко Р.Б. Гладьо Ю.Б., Шинкарик М.І., Клендій О.М. Динамічний розрахунок запобіжного пристрою шнекового транспортера . *Вісник інженерної академії України*. 2014. № 2. С.163–168.

7. Матвійчук А.В. Розробка і дослідження дворядних кулькової і кульково-клинової запобіжних муфт коренеклубнезбиральних машин: автореф. дис. …канд. техн. наук. Тернопіль, 1996. 20с.
8. Гевко Р.Б. Клендій О.М. Обґрунтування параметрів робочих поверхонь захисного пристрою шнекового транспортера за контактними напруженнями в елементах зачеплення . *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України.* 2014. Вип. 194, Ч.1. С.164–174.
9. Гевко Р.Б. Клендій О.М. Визначення контактних напружень в елементах зачеплення запобіжної муфти . *Сучасні технології промислового комплексу-2016: Матеріали ІІ-ої Міжнародної науково-практичної конференції (*14–18 вересня, 2016 р.). Херсонський національний технічний університет. С. 134–137.
10. Оптимізація габаритів запобіжних фрикційних муфт шляхом уточнення коефіцієнту тертя / В.О. Малащенко, П.С. Коруняк, В.В. Малащенко, А.О. Борис. *Подъемно-транспортнаятехника*. 2013. №3 (39). С.22–29.
11. Поліщук В.А., Гевко Р.Б. Підвищення надійності захисту робочих органів коренезбиральних машин . *Вісник Національного аграрного університету. Т. 2 "Перспективні технології вирощування та збирання цукрових буряків"*. 1997. С. 79–82.

Referencis

1. Hevko, R.B. & Klendiy, O.M. (2014). The investigation of the process of a screw conveyer safety device actuation . *INMATEH: Agricultural engineering*, *vol. 42, 1*, 55–60 [in English].
2. Hevko, R.B. Rozum, R.I. & Klendii, O.M. (2016). Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors . *INMATEH: Agricultural engineering*, *Vol.50, 3*, 89–94 [in English].
3. Hevko, R.B. & Klendii, O.M. (2013). Metodyka provedennia doslidzhen shnekovoho transportera iz zapobizhnym prystroiem [Research methodology of a screw conveyor with a safety device] . *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. Statei – Agricultural machines: collection of science articles, Issue 24*, 67–74 [in Ukrainian]
4. Kindratskyi, B.I. & Shpak, O.O. (2008). Dynamika pryvodu z kulkovoiu zapobizhnoiu muftoiu, osnashchenoiu blokuvalnym prystroiem [Dynamics of a drive with a safety ball coupling equipped with a locking device] . *Visnyk NTU «KhPI». Temat. vyp. «Mashynoznavstvo i SAPR» – Bulletin of NTU "KhPI". Subject. issue "Mechanical science and CAD", 14,* 53–65 [in Ukrainian]
5. Hevko, R.B., Klendiy, M.B. & Klendiy, O.M. (2016). Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyer. *INMATEH: Agricultural engineering , Vol.48*, *1*, 29–34 [in English].
6. Hevko, R.B., Hlado, Yu.B., Shynkaryk, M.I. & Klendii, O.M. (2014). Dynamichnyi rozrakhunok zapobizhnoho prystroiu shnekovoho transportera [Dynamic calculation of the safety device of the screw conveyor] . *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 2*, 163–168 [in Ukrainian].
7. Matviichuk A.V. (1996). Rozrobka i doslidzhennia dvoriadnykh kulkovoi i kulkovo-klynovoi zapobizhnykh muft koreneklubnezbyralnykh mashyn [Development and research of double-row ball and ball-wedge safety clutches of root and club harvesting machines] . *Extended abstract of candidate's thesis*. Ternopil [in Ukrainian]
8. Hevko, R.B. & Klendii, O.M. (2014). Obgruntuvannia parametriv robochykh poverkhon zakhysnoho prystroiu shnekovoho transportera za kontaktnymy napruzhenniamy v elementakh zacheplennia [Justification of the parameters of the working surfaces of the protective device of the screw conveyor according to the contact stresses in the engagement elements Justification of the parameters of the working surfaces of the protective device of the screw conveyor according to the contact stresses in the engagement elements] . *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy – Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Issue 194*, 1, 164–174 [in Ukrainian]
9. Hevko, R.B. & Klendii, O.M. (2016). Vyznachennia kontaktnykh napruzhen v elementakh zacheplennia zapobizhnoi mufty [Determination of contact stresses in safety clutch engagement elements] . *Modern technologies of the industrial complex-2016: II-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia (14–18 veresnia, 2016r., Kherson) – II International Scientific and Practical Conference (134–137).* Khersonskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. [in Ukrainian]

10. Malashchenko, V.O., Koruniak, P.S. Malashchenko, V.V. & Borys, A.O. (2013). Optymizatsiia habarytiv zapobizhnykh fryktsiinykh muft shliakhom utochnennia koefitsiientu tertia [Optimizing the dimensions of safety friction clutches by refining the friction coefficient] . *Pod#emno-transportnajatehnika – Lifting and transport equipment, 3 (39),* 22–29 [in Ukrainian].
11. Polishchuk, V.A. & Hevko, R.B. (1997). Pidvyshchennia nadiinosti zakhystu robochykh orhaniv korenezbyralnykh mashyn [Increasing the reliability of the protection of the working organs of root-harvesting machines Increasing the reliability of the protection of the working organs of root-harvesting machines] . *Visnyk Natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Vol. 2. "Perspektyvni tekhnolohii vyroshchuvannia ta zbyrannia tsukrovykh buriakiv" – Increasing the reliability of the protection of the working bodies of root-harvesting machines. Bulletin of the National Agrarian University. T. 2 "Promising technologies for growing and harvesting sugar beets".* 79–82 [in Ukrainian]

Volodymyr Bulgakov, Prof., DSc.**, Oleksandra Trokhanyak,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Research and Improvement of Safety Mechanisms of Screw Conveyors

Many different types of safety mechanisms that are used for mechanical processing machines, such as screw conveyors, to one degree or another provide the requirements set for them regarding the process of functioning during the occurrence of critical loads on the conveyor screws. However, traditional safety ball and cam couplings, when triggered, cause significant shock dynamic loads, and this subsequently causes the destruction of both couplings and conveyor drives. Friction safety clutches have low operating accuracy and do not allow reliable protection of working bodies and drives of machines. Therefore, in order to ensure reliable protection of the working bodies and drives of conveyors, with minor shock loads during the operation of the safety mechanisms, it is advisable to develop new designs of safety ball couplings with closed circular profiles of the engagement elements.

The purpose of the work is to increase the operational performance and reliability of the safety clutch by developing a new design of the safety mechanism, which will make it possible to create a wide range of elastic mode of operation before the safety one in the event of an overload of the conveyor screw. The research was carried out using the methods of the theory of mathematical and computer modeling. the method of mathematical planning of the experiment.

The article presents new developments of the protective mechanism of the conveyor, which will provide protection of the working bodies against overloads in the axial direction. The article presents theoretical equations for determining the change in torque during clutch activation depending on the angle of relative rotation of the half-couplings and the design and technological parameters of the coupling elements. The work presents graphical dependencies and analyzes the intensity of influence of various parameters on the nature and magnitude of the torque, developed appropriate stands and methods for conducting experimental studies to determine the recommended parameters of safety clutches, as well as presented the results of the conducted experiments.

protective mechanisms, safety clutch, structural and kinematic parameters, load, experimental stand, working bodies

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

UDC 629.33 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.32-38

Igor Beshlyage, Assoc. Prof., PhD tech. sci.**, Leonid Malay**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.**, Victor Popescu,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
State University of Moldova, Chisinau, Moldova
e-mail: besleaga1@gmail.com, m.leondanus@gmail.com, v.popescu@mail.ru

Comprehensive Evaluation of Synthetic Motor Oil

The paper presents studies of the main physical and chemical indicators of the operation of synthetic oils. The following indicators were determined: kinematic viscosity at 100°C, viscosity index (IV); general base indicator, mg KOH/1g of oil, ignition temperature in an open crucible, °C, absolute density, g/cm3 (at t° at 20°C), dynamic viscosity and sulfonated ash content (%). In addition, comparative studies of the technical and economic indicators of regulatory and technical maintenance when changing engine oil were carried out.
kinematic viscosity, viscosity index, alkalinity index, flash point, absolute density

Formulation of the problem. Lubrication, an absolutely necessary process for any transport unit or mechanical structure with moving parts, concerns technicians of all types, from educational, research and development offices to simple or the most complex industrial systems. Lubricants are involved in all processes related to movement. The quality of lubricants determines the operation of machines and their reliability.

Correct selection of a lubricant is a complex action, determined by a number of factors that must be taken into account: design factors (type of tribosystem, its accessibility for lubrication, quality and quantity of lubricant, method of lubrication, etc.), operating mode factors (load, speed, etc.). etc.), environmental factors (ambient temperature and pressure, presence of pollution, etc.).

For a long time it was believed that the best substances with lubricating properties were: animal fats and vegetable oils. With the development of internal combustion engines, mineral oils (from petroleum) appeared.

Modern powerful machines, complex mechanisms and automatic machines, and the development of jet technology place great demands on lubricants, and in this case, mineral oils do not satisfy these requirements.

For modern technology, it is necessary to use oils that operate in the temperature range (-120°C – +500°C), which can withstand very high loads and speeds and are resistant in aggressive environments.

Analysis of recent research and publications. Technical progress is closely related to improving the quality of lubricating oils and the development of new types of oils that meet the increased requirements of modern technology (including for cars).

Scientific research in various directions is carried out by the science of cymatology, namely [1, 2]:

- study of oil operating conditions in engines and new machines;
- study of the chemical, physical and operational properties of lubricants;
- behavior of oils and changes in properties in engines during transportation;
- development of new methods of testing, studying and monitoring oil quality;
- study of patterns of changes in oil quality in internal combustion engines or cars.

© Igor Beshlyage, Leonid Malay, Victor Popescu, 2023

Statement of the task. The purpose of the work is study of physicochemical and performance characteristics of synthetic oils used in automobile engines. This can happen in two ways:

a) study of the main physical and chemical parameters of the oil;

b) determination of the quality of oils by a generalized complex indicator (Kkg) which consists of the sum of indicators of the diagnostic block of the determining one (Ki).

Presentation of the main material. Testing of synthetic oils is a complex and multifaceted process, during which the main physical and chemical parameters of the oil are determined and studied [3], namely:

- kinematic viscosity at 100°C in sSt in accordance with ASTM D 445;
- viscosity index (IV);
- general base index (BBP), mg KOH/1 g of oil according to ASTM D 664;
- ignition temperature in an open crucible, 0C according to GOST 1369-82;
- absolute density, g/cm3 (at t at 20°C);
- dynamic viscosity;
- sulfonated ash content, % according to ASTM D 874.

These parameters are basic, and assessment methods are standardized [3].

To evaluate the performance properties of synthetic oils, research test methods are used to determine resistance to thermal oxidation - resistance to the formation of acids and resins at high temperatures.

It is known that resins on warm surfaces form carbon formations that cause intense engine wear and blocking of segments. Oxidation products cause corrosion of engine parts and accelerate the aging of rubber sealing materials.

When determining the stability of oil during thermal oxidation, in this case, oil oxidation is carried out at high temperatures corresponding to the temperature of the first compression segment of piston engines.

This method is used at the Bo-4 installation, where the oxidation of motor oil is carried out at t = 180°C. This method corresponds to the operating conditions of medium-boost car engines.

Modern highly accelerated automobile engines require more stringent oil conditions, and the oil's thermal oxidation requirements increase. Oil oxidation occurs at t = 235°C in the presence of a Cu catalyst. The stability of the oil during thermal oxidation is assessed by the increase in the optical density of the oil, which characterizes the increase in the amount of oxidation products in the oil.

Synthetic oils of viscosity classes SAE 5W-30 and SAE 5W-40 were tested, corresponding to API SM, SL, SJ; ACEA A3/B3/B4.

Tested brands of synthetic oils.

- LIQUI Moly synthoil High Tech Germany – viscosity class: SAE 5W – 40; API SM/CF; ACEA A3/B4, recommended for BMW Longlife-98, MB 229.3, Porsche A40, VW 502 00, VW 505 00;
- Elf Evolution 900SXR 5W-40; API SM/CF; ACEA 2007: A3/B4, recommended for RENAULT: RN0710, RN0700 - gasoline (including turbo) and diesel engines without particulate filter;
- Mobil Super™ Synthetic 5W-30 Saudi Arabia; API SN; API SN PLUS; API SP; ILSAC GF-6A; FORD WSS-M2C961-A1, recommended for use in many types of gasoline cars of modern and earlier design in America (Ford, GM, Chrysler...), Japanese (Toyota, Nissan, Mistsubishi) and Korean (Hyundai, Kia);
- SHELL Helix Ultra Finlandia; - viscosity class: SAE 5W – 40; API SN/CF; ACEA A3/B3, A3/B4; BMW LL-01; recommended for MB 229.5, 226.5; VW 502.00/505.00;

Porsche A40; Renault RN0700, RN0710; PSA B71 2296, Ferrari. Complies with Fiat 9.55535-Z2 and Chrysler MS-10725.

The main function of motor oil (including for various other machines and equipment) is to prevent wear and excessive friction. Although other oil characteristics such as dispersibility, thermal stability, corrosion resistance, etc. are important, the ability to lubricate moving parts remains the main parameter for the use of a lubricant.

It is known that in modern conditions, during the operation of engines and various machines, a large amount of energy is lost due to friction, even with their lubrication provided. Due to the tribological and technological design, it was possible to save 11% of annual energy consumption.

Although mineral oil technology and lubricant formulations with the necessary additives have achieved certain advances, synthetic oils currently serve as automotive lubricants, either alone or in a mixture with mineral oils. When comparing the properties of mineral oils with the properties of modern types of synthetic oils, it was found that synthetic hydrocarbons and esters provide the best performance. Their cost is 1.5-2 times higher than that of conventional mineral oils.

The main applications of synthetic oils, which are more important from a production point of view, are shown below.

The qualitative characteristics of the tested synthetic oils are presented in Table 1.

Table 1 – Qualitative characteristics of synthetic oils

Options	**SAE 5W-40 „LIQUI Moly”** synthoil High Tech	**SAE 5W-40 „SHELL Helix Ultra”**	**SAE 5W-30 „Elf Evolution”**
Match the classes	API SM/CF; ACEA A3/B4	API SN/CF; ACEA A3/B3, A3/B4	API SM/CF; ACEA 2007: A3/B4
Kinematic viscosity at 100°C, sSt	14,0	14,2	14,0
Viscosity index	167	175	180
Density at 20°C, g/cm3	850	855	848
Flash point, °C	210	220	226
Alkalinity index, mg KOH/g, oils	9,8	7,5	7,2
Freezing temperature, °C	-40	-40	-30
Ash content, GOST 1461-75	1,5	1,3	1,1

Source: developed by the author

Physic-chemical parameters of oils: density, kinematic viscosity, viscosity indices, alkalinity, ignition temperature vary depending on their viscosity class.

The recent rise in oil prices has generated increased interest in fuel efficiency. It has long been known that fluid oils can significantly save fuel in automobile engines, but these oils have high consumption (high volatility) and do not provide sufficient wear protection. Since synthetic oils do not have these disadvantages, some European manufacturers have developed motor oils based on synthetic oils or blends with mineral oils, which have given good results in operation.

Numerous studies on the use of synthetic oils as motor oil bases, alone or in mixtures with mineral oils, have shown the interesting possibilities of esters. Mixtures with diesters in a proportion of 10 - 50% in mineral oils, with appropriate additives (antioxidant, detergent-dispersant, polymethacrylate for viscosity index, etc.) provided all-season oils, successfully tested on engine test benches and in operation, especially in cold climates. By increasing the proportion of diester, a better degree of cleanliness of engine parts is achieved. The benefits of diester oils for cold starting of engines have been fully confirmed.

Recent tests on a large number of vehicles with synthetic oil SAE 5W-20 compared to two mineral oils SAE 10W-40 and SAE 15W-50 have shown numerous advantages; 4-5% fuel economy, oil change after 40,000 km, easy cold starts, cleaner engine, less wear, low oil consumption, more nervous engine. The corresponding SAE 75W synthetic differential oil, with a low viscosity compared to SAE 80W-90 oil, resulted in fuel savings of approximately 2%.

Synthetic non-hydrocarbon based oils attack many of the elastomers from which gaskets are made or, sau represent relatively hydrolytic stability, etc. A process based on the conversion of petroleum hydrocarbons into a suitable form will, of course, be more economical than the production of diesters, etc. Synthetic hydrocarbons will further benefit from 30 years of additive manufacturing experience. In the near future, diesters are expected to be used in small quantities in relatively fluid all-season automotive oils with additives and friction modifiers.

The lack of accurate indicators of engine oil rejection in tractor, automobile and combine engines leads to an unjustified reduction in its service life, causing wear of parts and increasing operating costs for lubricants.

It is proposed to evaluate the condition of the oil using a generalized complex indicator (K_{cg}), which consists of the sum of indicators that determine the diagnostic unit Ki. A defining diagnostic indicator is selected, analyzing the effect of each of them on engine operation. In particular, on the wear rate of parts. Random variations of the parameter (wear rate) Ufrom (t) are written as a function U_{is} (e)= $f(\alpha_1;\alpha_2;\alpha_3;\ldots\alpha_n)$, where α - is the value of the diagnostic indicator.

Based on the above, we have developed a method for assessing the quality of motor oil using a generalized coefficient that includes 6 diagnostic indicators, silicon content in the oil (additionally characterizes the operation of the air filter); mechanical impurities in the oil (characterizes the operation of oil-filtering devices), iron content in the oil, as well as its viscosity, ash content, general base indicator (GBP). Maintenance of the air purification system and oil filtration system is carried out based on the corresponding diagnostic parameter.

The K_{cg} indicator is expressed by the formula:

$$K_{cg}= \sum_{i=1}^{i=n} K_i - T \cdot d, \quad (1)$$

where K_i – indicator of the condition of the engine oil according to the *i*-th diagnostic indicator;

n – number of diagnostic indicators determined;

d – coefficient of intensity of variation of diagnostic indicators depending on the work performed by the engine, points/motor hours;

T – the amount of work performed by the engine, engine hours.

The oil is changed only when the generalized complex indicator of the rejection value is reached, equal to 100 points (other units of measurement can be accepted, for example, %, fractions of a unit, etc.).

To assess the intensity of its action, it is proposed to maintain an evaluation indicator - the coefficient of the oil's action mode.

$$\gamma = \frac{V_u / P_e}{Q_{h\cdot} \cdot \varphi} \cdot K_c, \tag{2}$$

where V_u – capacity of the engine lubrication system, l;

φ – dimensionless coefficient characterizing oil purification in a centrifugal filter;

K_c – dimensionless coefficient characterizing the oil group.

Because

$$\varphi = \varphi_0 \cdot (1 - \frac{m_o}{m_a}), \tag{3}$$

where φ_o – initial coefficient of oil purification in the centrifugal filter;

m_o – mass of substance deposited in an oil centrifuge, kg;

m_a – amount of impurities allowed in the centrifuge, kg.

Получим:

$$\gamma = \frac{V_u / P_e}{Q_h \cdot \varphi_o \left(1 - \frac{m_o}{m_a}\right)} \cdot K_c. \tag{4}$$

So, the oil action coefficient is indirectly (through power) related to the operating conditions of the engine oil. (such as: effective pressure in the cylinder, piston speed, crankshaft rotation speed, number of engine strokes, amount of heat released during fuel combustion).

The procedure for operational assessment of the quality condition of engine oil using the generalized complex coefficient (D241L engine) with a volume of work performed equal to 1200 engine hours is as follows:

1 – an oil sample will be taken and analyzed using known methods;

2 – using the classic nomogram, which determines the value of each parameter and determines the overall value of K_i = 60.0 points;

3 – taking into account the coefficient α=0,0149 and the work performed by the engine, T=1200 motor hours, the quality condition of the oil at the time of its use is assessed.

$$K_I = \sum_1^n K_i - T \cdot \alpha = 60 - 1200 \cdot 0{,}049 = 60 - 17{,}88 = 42 \text{ points}$$

4 - given the degree of defective condition of the oil, equal to 100 points, the oil can still be used in the future, since Kcg = 42, which is less than 100.

Comparative studies regarding the technical and economic indicators of regulatory and technical maintenance when replacing engine oil, as well as the proposed forms of control based on a generalized complex coefficient, have demonstrated that the implementation of the proposed measures ensures a reduction in engine oil consumption by 12...20%, and repair costs by 10 …20%.

Conclusions. Physico-chemical parameters: density, kinematic viscosity, viscosity index, ignition temperature of synthetic oils vary depending on their viscosity class.

Synthetic oils provide high lubricity and superior thermal stability compared to mineral oils.

When synthetic oils are used in car engines, they provide easy engine starting in cold conditions, fuel economy, low oil consumption, and oil changes after 40 thousand km.

Comparative studies regarding the technical and economic indicators of regulatory and technical maintenance and the proposed forms of control based on a generalized complex coefficient have demonstrated that the implementation of the proposed measures ensures a reduction in engine oil consumption by 12...20% and the cost of repair work by 10...20%.

Literature

1. Lacusta, I., et all. Materiale de exploatare pentru automobile. Ch: Centrul Ed. al UASM, 2013. 327 p. ISBM 978-9975-64-018-3.
2. Оценка необходимости замены моторного масла при эксплуатации тракторов по комплексно-обобщенному показателю. / Г.П. Лышко и др. Межвузовский сборник. Кишинев, 1982.
3. Frunze O. Cercetări privind eficienţa economică şi ecologică a utilizării uleiurilor vegetale pentru alimentarea MAC. Braşov, 2005. 169 p.
4. Молодан А.О. Підвищення енергетичної ефективності колісних машин методом відключення циліндрів в автотракторному двигуні . *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 2 (10). С. 48-53.
5. Молодан А.О. Вплив на потужність двигуна колісної машини механічних втрат при відключенні циліндрів . *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки* . 2018. №2 (82). С. 105-110.
6. Полянський О.С., Молодан А.О., Власенко О.В. Підвищення паливної економічності колісних машин відключенням частини циліндрів двигуна . *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 9. С. 57-61.
7. Polyanskii A., Molodan A., Potapov N. Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders . *Транспорт, екология – устойчиво развитие*: сб. докл. XXVI научн.-техн. конф. с межд. участ. Варна: Технически университет, 2020, 8-10 октября. С. 132-137.
8. Молодан А.А. Оценка технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя с учетом разделения потоков газов, проходящих в картер: дис. … канд. техн. наук. Харьков, ХНАДУ, 2011. 184 с.
9. Гутаревич Ю. Ф. Екологія та автомобільний транспорт : навч. посіб. / Ю. Ф. Гутаревич и др. Київ : Арістей, 2006. 292 с.
10. Двигуни внутрішнього згорання поршневі. Характеристики. Ч.1. Стандартні вихідні умови, оголошені потужність, витрати палива та мастила. Методи випробування: ДСТУ ГОСТ ИСО 3046-1:2004 (ГОСТ ИСО 3046-1-2002, IDT); [Введ. 01.07.05.] . Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 23 с.
11. Захарчук В. І. Використання альтернативних моторних палив у засобах технологічного транспорту. Луцьк : Луцький НТУ, 2015. 233 с.
12. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є. Автомобільні двигуни. Київ. 2007. 474с.

References

1. Lacusta, I. et al. (2013). Materiale de exploatare pentru automobile. Ch: Centrul Ed. al UASM [in English].
2. Lyshko, G.P., Levshanov, G.G. et al. (1982). *Ocenka neobhodimosti zameny motornogo masla pri jekspluatacii traktorov po kompleksno-obobshhennomu pokazatelju* [*Assessment of the need to replace engine oil when operating tractors using a comprehensive generalized indicator*]. Mezhvuzovskij sbornik. Kishinev,
3. Frunze, O. (2005). Cercetări privind eficienţa economică şi ecologică a utilizării uleiurilor vegetale pentru alimentarea MAC. Braşov [in Romanian].
4. Molodan, A.O. (2019). Pidvyschennia enerhetychnoi efektyvnosti kolisnykh mashyn metodom vidkliuchennia tsylindriv v avtotraktornomu dvyhuni [Increasing the energy efficiency of wheeled

vehicles by connecting cylinders in an automobile and tractor engine]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – News of mechanical engineering and transport , № 2 (10)*, 48-53 [in Ukrainian].
5. Molodan, A.O. (2018). Vplyv na potuzhnist' dvyhuna kolisnoi mashyny mekhanichnykh vtrat pry vidkliuchenni tsylindriv [The effect of mechanical losses on the power of the wheeled machine engine when the cylinders are disconnected]. *Visnyk Zhytomyrs'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Newsletter of the Zhytomyr State Technological University. Technical Sciences, №2 (82),* 105-110 [in Ukrainian].
6. Polians'kyj, O.S., Molodan, A.O. & Vlasenko, O.V. (2017). Pidvyschennia palyvnoi ekonomichnosti kolisnykh mashyn vidkliuchenniam chastyny tsylindriv dvyhuna [Enhancement of the fuel economy of wheeled vehicles to the connection of parts of the engine cylinders]. *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service for agro-industrial, forestry and transport complexes, № 9*, 57-61 [in Ukrainian].
7. Polyanskii, A., Molodan, A. & Potapov, N. (2020). Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders . Transport, ekologija – ustojchivo razvitie: *XXVI nauchn.-tehn. konf. s mezhd. uchast. Varna: Tehnicheski universitet, (8-10 oktjabrja, 2020),* 132-137 [in English].
8. Molodan, A.A. (2011). Ocenka tehnicheskogo sostojanija cilindro-porshnevoj gruppy dvigatelja s uchetom razdelenija potokov gazov, prohodjashhih v karter [Assessment of the technical condition of the engine cylinder-piston group, taking into account the separation of gas flows passing into the crankcase]. *Candidate's thesis*. Har'kov, HNADU [in Russian].
9. Hutarevych, Yu.F. Zerkalov, D.V. & Hovorun, A.H. (2006). *Ekolohiia ta avtomobil'nyj transport* [*Ecology and road transport*]. Kyiv : Aristej [in Ukrainian].
10. Dvyhuny vnutrishn'oho zghorannia porshnevi. Kharakterystyky. Chastyna 1. Standartni vykhidni umovy, oholosheni potuzhnist', vytraty palyva ta mastyla. Metody vyprobuvannia [Piston internal combustion engines. Characteristics. Part 1. Standard initial conditions, declared power, fuel and lubricant consumption. Test methods]. (2005). *HOST YSO 3046-1-2002, IDT*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
11. Zakharchuk, V. I. (2015). *Vykorystannia al'ternatyvnykh motornykh palyv u zasobakh tekhnolohichnoho transportu* [*Use of alternative motor fuels in means of technological transport*]. Luts'k : Luts'kyj NTU [in Ukrainian].
12. Abramchuk, F.I., Hutarevych, Yu.F. & Dolhanov, K.Ye. (2007). *Avtomobil'ni dvyhuny* [*Automobile engines*]. Kyiv [in Ukrainian].

І.І. Бешляге, доц., канд. техн. наук, **Л.Г. Малай,** доц., канд. техн. наук, **В.С. Попеску,** доц., канд. техн. наук
Державний аграрний університет Молдови, м. Кишинів, Молдова

Комплексна оцінка синтетичної моторної оливи

У роботі представлені дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних характеристик синтетичних олив, що використовуються в автомобільних двигунах. Це може досягти двома способами: дослідженням основних фізико-хімічних показників нафти та визначенням якості масел за узагальненим комплексним показником (Ккг), який складається із суми показників діагностичного блоку визначального (Кі).

Визначали такі показники: кінематичну в'язкість при 100°С, індекс в'язкості (IV); загальноосновний показник, мг КОН/1г олії, температура займання у відкритому тиглі, °С, абсолютна густина, г/см3 (при t° при 20 °С), динамічна в'язкість і сульфована зольність (%). Крім того, проведено порівняльні дослідження техніко-економічних показників нормативно-технічного обслуговування при заміні моторного масла.

Використання синтетичних масел в двигунах автомобілів забезпечує легкий запуск двигуна в холодних умовах, економію палива, низьку витрату масла, заміну масла після 40 тис. км. Порівняльні дослідження техніко-економічних показників нормативно-технічного обслуговування та запропонованих форм контролю на основі узагальненого комплексного коефіцієнта показали, що реалізація запропонованих заходів забезпечує зниження витрати моторного масла на 12...20 % і вартість ремонтних робіт на 10...20%.

кінематична в'язкість, індекс в'язкості, індекс лужності, температура спалаху, абсолютна густина

Одержано (Received) 02.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 14.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.313.6 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.39-50

С.П. Степаненко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., **О.П. Гриценко,** наук.співр.
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національна академія аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна
e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання стійкості руху асиметричної дискової борони

Виробнича необхідність розширення функціональних можливостей машинно-тракторних агрегатів (МТА), як найбільш затребуваних у невеликих господарствах внаслідок своєї високої енергонасиченості, надійності та універсальності в процесі виробництва сільськогосподарської продукції є важливим завданням, що вимагає застосування нових методологічних, практичних прийомів та актуальних конструкційних рішень. У наведеній статті розглядається застосування компенсатора зчіпної ваги, який встановлено на рамі та сниці асиметричної дискової борони, як одного зі способів раціонального перерозподілу зчіпної ваги у складі МТА у ході проведення передпосівного обробітку ґрунту. Математично обґрунтовується поліпшення можливості стійкості руху асиметричної дискової борони та застосування широкозахватних сільськогосподарських агрегатів, що надає можливість збільшити продуктивність їх застосування, знизити тимчасові та енергетичні витрати напередпосівний обробіток ґрунту.

асиметрична дискова борона, енергетичний засіб, МТА, зчіпна вага, перерозподіл, компенсатор

Постановка проблеми. Якісна передпосівна обробка ґрунту, закриття вологи та кришення верхнього родючого шару ґрунту з метою створення оптимальних умов для вегетації сільськогосподарських культур є важливою складовою в процесах рослинництва.

Однак не завжди тягово-зчіпні якості наявних у невеликих фермерських господарствах МТА, дають можливість використання високопродуктивної техніки, зокрема, асиметричних дискових борін внаслідок їх маси, які забезпечують більш якісний обробіток ґрунту, через високі значення сили опору руху. Конструкційно асиметричні дискові борони мають значну масу, що забезпечує якісну обробку ґрунту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом багатьох років проводилися наукові дослідження вітчизняними та іноземними вченими [1-7, 11, 13-16, 18-21], які обґрунтували складові методики вибору та комплектування тягових агрегатів на основі сучасних тракторів. У впровадженні ресурсозберігаючих технологій підготовки ґрунту для зернових після просапних культур широке застосування знаходять дискові борони із рядною установкою сферичних дисків, як на індивідуальній стійці так і на дисковій батареї. Обробіток ґрунту цими знаряддями відповідає вихідним стандартам для ґрунтообробних машин, забезпечуючи повне підрізання рослин та подрібнення грудок ґрунту до необхідного розміру фракції. Залежно від кількості паралельно розташованих рядів на рамі розрізняють дворядні, трирядні та чотирирядні дискові борони [8-10, 12, 17, 19]. Дворядні і трирядні моделі використовують для обробітку ґрунту після цукрових буряків і багаторічних трав, тоді як чотирирядні призначені для обробки ґрунту після великостеблових просапних культур, таких як кукурудза і соняшник.

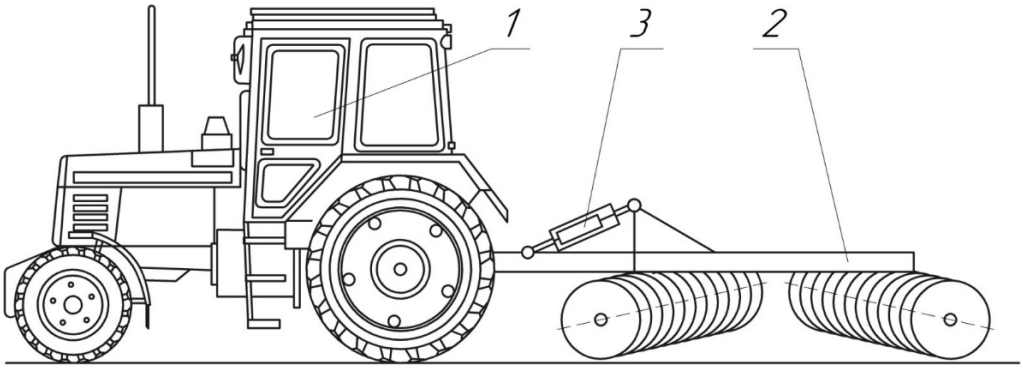
© С.П. Степаненко, О.П. Гриценко, 2023

Постановка завдання. Встановити математичні залежності та змоделювати процес стійкості руху асиметричної дискової борони та застосування широкозахватних сільськогосподарських агрегатів, що надає можливість збільшити продуктивність їх застосування, знизити тимчасові та енергетичні витрати на передпосівний обробіток ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Однак сучасні методи дають можливість перерозподілити зчіпну вагу між енергетичним засобом і бороною, що дозволить вирішити задачу зниження сили опору руху борони без зміни параметрів та якості обробки ґрунту, а також підвищити стійкість руху асиметричної дискової борони [7-8, 11].

Запропонований пристрій – компенсатор зчіпної ваги асиметричної дискової борони, здатен перерозподіляти частину зчіпної ваги між енергетичним засобом і бороною, через роботу силового гідроциліндра, що впливає на сницю, раму асиметричної дискової борони та зчіпний пристрій трактора, з метою регулювання раціонального заглиблення дисків асиметричної борони, а також зменшення витрат при застосуванні даного ґрунтообробного знаряддя, зниження його вартості та металоємкості, покращення якості передпосівного обробітку ґрунту, зменшення енергетичних витрат МТА (рис. 1, 2).

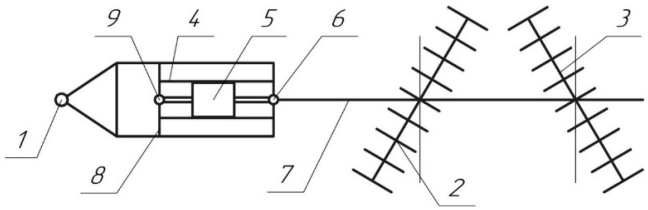
Компенсатор зчіпної ваги асиметричної дискової борони рис. 2, виконаний у вигляді пристрою 1, що складається з силового гідроциліндра 5, встановленого у кронштейні 4 на верхній фронтальній частині рами 7 дискових секцій асиметричної борони 2, 3 і осі 6, що проходить через вилку 9 силового гідроциліндра 5 та вбудованої між поперечками сниці борони.



1 – МТА; 2 – асиметрична дискова борона; 3 – компенсатор

Рисунок 1 – Схема МТА з встановленим компенсатором зчіпної ваги асиметричної дискової боронидля стійкостіїїруху

Джерело: розроблено авторами



1 –сниця; 2, 3–дискові секції асиметричної борони; 4 – кронштейн; 5 – силовий гідроциліндр; 6 – вісь; 7 – фронтальна частина рами;8 - вісь, 9 -вилка.

Рисунок 2 – Схема асиметричної дискової борони із встановленим компенсатором зчіпної вагидля стійкостіїїруху

Джерело: розроблено авторами

Принцип роботи запропонованого технічного пристрою наступний: під час руху МТА для стабілізації стійкості руху асиметричної дискової борони оператор енергетичного засобу за допомогою гідророзподільника подає робочу рідину в силовий гідроциліндр, шток якого при виході тисне на вісь, притискаючи сницю асиметричної дискової борони в зчіпному пристрої енергетичного засобу, перерозподіляючи зчіпну вагу з рами борони на задній міст енергетичного засобу, що дозволяє збільшити тягово-зчіпні властивості МТА, знизити буксування рушіїв, підвищити агротехнічну швидкість руху МТА та регулювати глибину заглиблення дисків борони з одночасною стійкістю руху дискової борони.

При необхідності заглиблення дисків борони або зміні курсової стійкості руху борони, оператор за допомогою гідророзподільника подає робочу рідину в силовий гідроциліндр, шток якого підіймає через вісь сницю борони, збільшуючи навантаження на вертикальних шарнірах кріплення сниці та зчіпному пристрої енергетичного засобу, піднімаючи його і перерозподіляючи зчіпну вагу із зчіпним пристроєм та заднім ведучім мостом енергетичного засобу на раму борони, дозволяючи при цьому регулювати глибину заглиблення дисків борони в процесі руху та курсову стійкість руху борони.

Для обґрунтування конструкційно-кінематичних параметрів МТА із встановленим компенсатором зчіпної ваги асиметричної дискової борони розглянемо рівновагу сниці та рами борони у статичному стані, як наведено на рис. 3 та рис. 4. В робочого режимі під навантаженням енергетичного засобу та розвантаженням асиметричної дискової борони (рис. 5), а також в режимі розвантаження енергетичного засобу та завантаженням асиметричної дискової борони (рис. 6).

Представимо сницю та раму борони як складову балку [18-20]. Використовуючи рис. 3, визначимо діючі сили та реакції на МТА у статичному режимі.

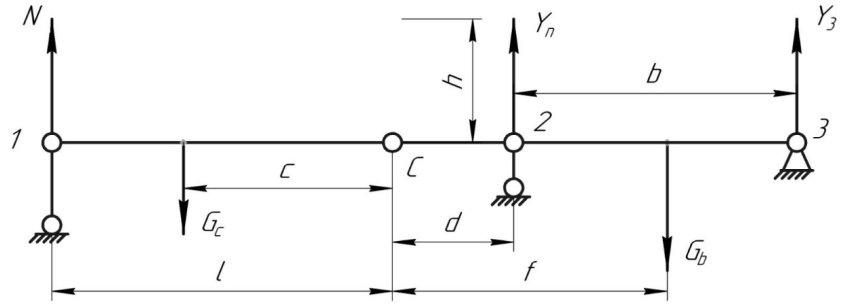


Рисунок 3 – Схема до визначення сил та реакцій борони в статичному стані

Джерело: розроблено авторами

Складемо рівняння рівноваги для складових частин даної конструкції: для сниці та рами борони (рис. 4).

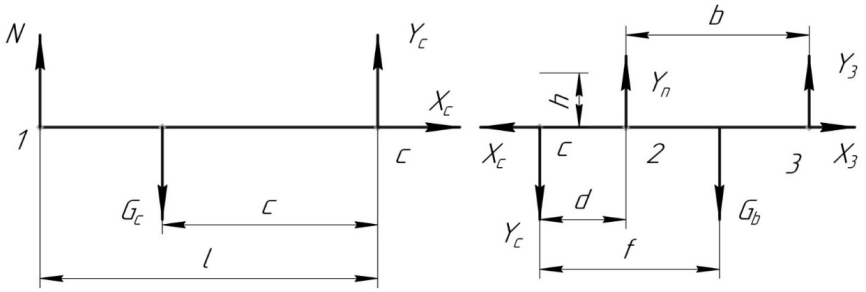


Рисунок 4 – Розрахункова схема до рівняння рівноваги сниці та рами борони МТА у статичному стані (компенсатор не підключений)

Джерело: розроблено авторами

Позначення, які наведено на рис. 3, рис. 4 та рис. 5 мають наступні тлумачення: G_c – сила тяжіння сниці, Н; G_b - сила тяжіння рами борони, Н; N - реакція навантажуваної сниці на зчіпний пристрій енергетичного засобу в точці 1; l – довжина сниці борони, м; C - точка кріплення шарніра сниці та кронштейна гідроциліндра; c - відстань від точки C до центру тяжіння сниці, м; h – висота кронштейна гідроциліндра, м; a – відстань від точки прикладання навантаження P до точки C, м; f – відстань від точки C до центру тяжіння борони, м; d –відстань від точки C до передньої частини (секції) борони, м; b – відстань між секціями борони, м; Y_c - реакція сниці в точці C; Y_n - реакція передньої частини (секції) борони в точці її кріплення 2; Y_3 - реакція задньої частини (секції) борони у точці її кріплення 3.

$$\sum M_1 = 0 \quad ; \quad -G_c \cdot (l-c) + Y_c \cdot l = 0 \; ; \tag{1}$$

$$\sum M_c = 0 \quad ; \quad -N \cdot l + G_c \cdot c = 0 \; ; \tag{2}$$

При вирішенні (1)-(2) отримуємо:

$$Y_c = \frac{G_c \cdot (l-c)}{l} \; ; \tag{3}$$

$$N = \frac{G_c \cdot c}{l} \; ; \tag{4}$$

Розглядаємо складову конструкцію борони та складаємо рівняння рівноваги щодо вертикальних реакцій Y_n та Y_3, Y_c:

$$\sum M_2 = 0 \quad ; \quad -G_b \cdot (f-d) + Y_c \cdot d + Y_3 \cdot b = 0 \; ; \tag{5}$$

$$\sum M_3 = 0 \quad ; \quad G_b \cdot (p-f+d) + Y_c \cdot (b+d) - Y_n \cdot b = 0 \; ; \tag{6}$$

При розв'язанні рівнянь (5)-(6) отримуємо:

$$Y_3 = \frac{G_b \cdot (f-d) - Y_c \cdot d}{b} = \frac{G_b \cdot (f-d)}{b} - \frac{G_c \cdot d \cdot (l-c)}{b \cdot l} \; ; \tag{7}$$

$$Y_n = \frac{G_b \cdot (p-f+d) + Y_c \cdot (b+d)}{b} = \frac{G_b \cdot (p-f+d)}{b} + \frac{G_c \cdot (l-c) \cdot (b+d)}{b \cdot l} \; ; \tag{8}$$

Або в іншому вигляді:

$$Y_3 = G_b \cdot \frac{(f-d)}{b} - G_c \cdot \frac{d \cdot (l-c)}{b \cdot l} \; ; \tag{9}$$

$$Y_n = G_b \cdot \frac{(p-f+d)}{b} + G_c \cdot \frac{(l-c) \cdot (b+d)}{b \cdot l} \; ; \tag{10}$$

Складемо рівняння рівноваги для сниці та рами борони при висуванні штока гідроциліндра компенсатора зчіпної ваги в робочих режимах компенсатора, тобто в режимі навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони (рис.5).

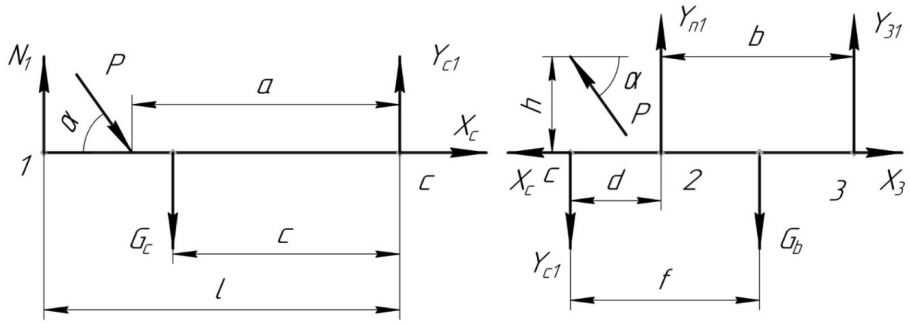


Рисунок 5 – Розрахункова схема до рівняння рівноваги сниці та рами борони МТА (компенсатор зчіпної ваги в режимі навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони)

Джерело: розроблено авторами

Позначення, які наведено на рис. 5. мають таку інтерпретацію: P – навантаження, що передається, Н; α − кут дії навантаження; Y_{c1} − реакція сниці у точці C; $N1$ – реакція у зчіпному пристрої МТА; Y_{n1} – реакція передньої частини(секції) борони в точці її кріплення 2; Y_{31} − реакція задньої частини (секції) борони у точці її кріплення 3; X_c, X_3 - – горизонтальні реакції.

Рівняння рівноваги для сниці за рис. 5, буде мати вигляд:

$$\sum M_1 = 0; \quad -G_c \cdot (l-c) - P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha + Y_{c1} \cdot l = 0; \tag{11}$$

$$\sum M_c = 0; \quad -N1 \cdot l + P \cdot a \cdot \sin\alpha + G_c \cdot c = 0; \tag{12}$$

При вирішенні (11)-(12) отримуємо:

$$Y_{c1} = \frac{G_c \cdot (l-c) + P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha}{l} = \frac{G_c \cdot (l-c)}{l} + \frac{P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha}{l}; \tag{13}$$

$$N1 = \frac{P \cdot a \cdot \sin\alpha + G_c \cdot c}{l} = \frac{P \cdot a \cdot \sin\alpha}{l} + \frac{G_c \cdot c}{l}; \tag{14}$$

Математична модель детермінованого факторного аналізу для N_1 набуває вигляду, як наведено на рис.6:

$$N1(\alpha, P) = 0{,}01 \cdot \alpha \cdot P + 0{,}002 \cdot \alpha + 0{,}12 \cdot P + 0{,}04; \tag{15}$$

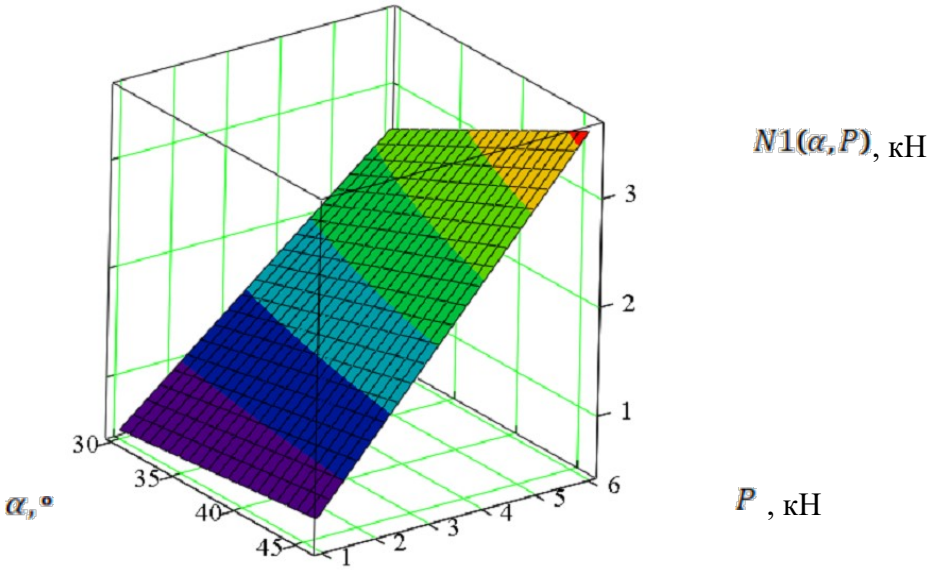


Рисунок 6 – Модель детермінованого факторного аналізу для N_1 в режимі навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони

Джерело: розроблено авторами

Рівняння рівноваги для рами борони:

$$\sum M_2 = 0 \; ; -G_b \cdot (f-d) - P \cdot h \cdot \cos\alpha - P \cdot d \cdot \sin\alpha + Y_{c1} \cdot d + Y_{31} \cdot b = 0 \; ;(16)$$

$$\sum M_3 = 0 \; ; -P \cdot h \cdot \cos\alpha + P \cdot (b+d) \cdot \sin\alpha + Y_{c1} \cdot (b+d) - Y_{n1} \cdot b + G_b \cdot (b+d-f) = 0 \; ;(17)$$

При вирішенні (16)-(17) остаточно отримуємо:

$$Y_{31} = \frac{G_b \cdot (f-d) + P \cdot h \cdot \cos\alpha + P \cdot d \cdot \sin\alpha - Y_{c1} \cdot d}{b}; \quad (18)$$

$$Y_{n1} = \frac{-P \cdot h \cdot \cos\alpha + P \cdot (b+d) \cdot \sin\alpha + Y_{c1} \cdot (b+d) + G_b \cdot (b+d-f)}{b}; \quad (19)$$

Або після перетворень і підстановки рівняння (13) в залежності (18) та (19) остаточно отримаємо:

$$Y_{31} = \frac{G_b \cdot (f-d)}{b} + \frac{P \cdot h \cdot \cos\alpha}{b} + \frac{P \cdot d \cdot \sin\alpha}{b} - \left[\frac{G_c \cdot (l-c)}{l} + \frac{P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha}{l}\right] \cdot \frac{d}{b}; \quad (20)$$

$$Y_{n1} = \frac{-P \cdot h \cdot \cos\alpha}{b} + \frac{P \cdot (b+d) \cdot \sin\alpha}{b} + \left[\frac{G_c \cdot (l-c)}{l} + \frac{P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha}{l}\right] \cdot \frac{(b+d)}{b} + \frac{G_b \cdot (b+d-f)}{b}; \quad (21)$$

Математична модель детермінованого факторногоаналізу для Y_{31} наведена на рис. 7 і має такий вигляд:

$$Y_{31}(\alpha, P) = e^{-0{,}005 \cdot \alpha} \cdot [0{,}38 \cdot P + 1{,}82] \quad (22)$$

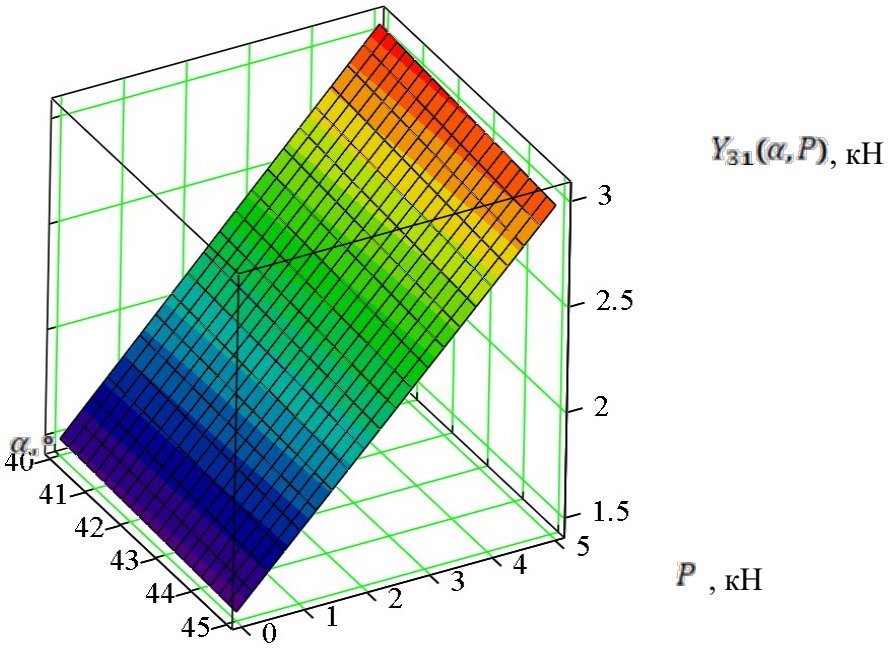


Рисунок 7 – Модель детермінованого факторного аналізу для $Y_{31}(\alpha, P)$ у режимі навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони

Джерело: розроблено авторами

Для Y_{n1} модель детермінованого факторного аналізу наведена на рис. 8 і має такий вигляд:

$$Y_{n1}(\alpha, P) = 0{,}001 \cdot \alpha^2 \cdot P + 0{,}003 \cdot \alpha^2 - -0{,}0075 \cdot \alpha \cdot P - 0{,}25 \cdot \alpha - 0{,}2 \cdot P + 11{,}4 \quad (23)$$

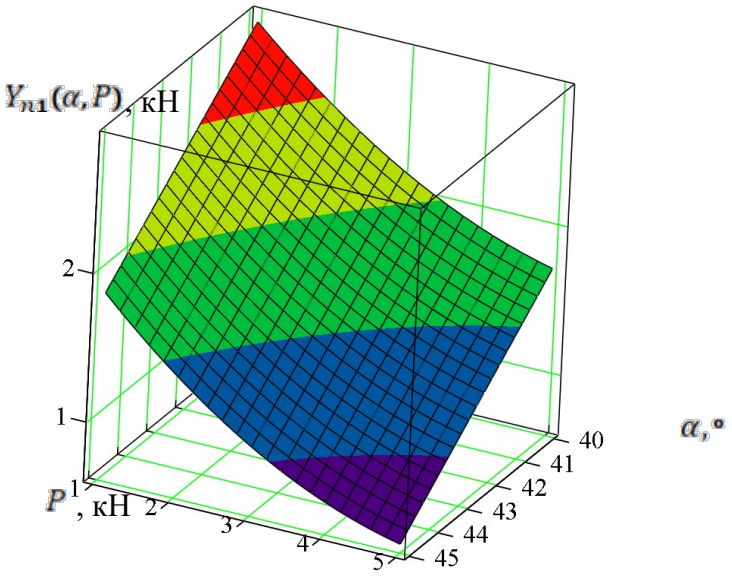


Рисунок 8 – Модель детермінованого факторного аналізу для $Y_{n1}(\alpha, P)$ в режимі навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони

Джерело: розроблено авторами

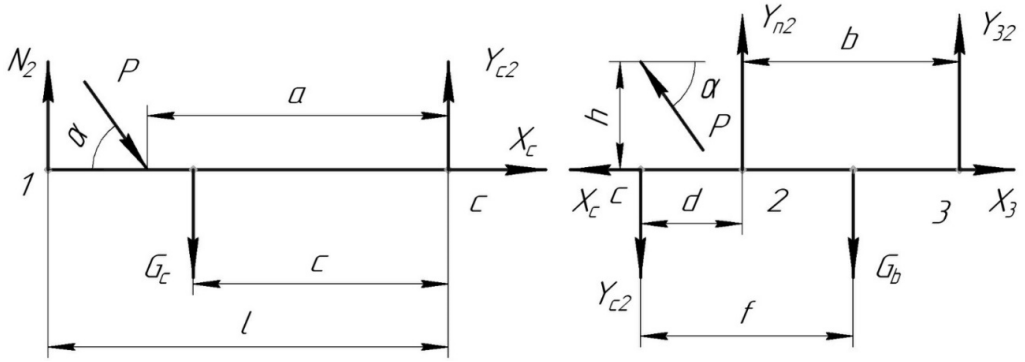


Рисунок 9 – Розрахункова схема до рівняння рівноваги сниці та рами борони МТА (компенсатор зчіпної ваги в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони)

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи отримані залежності(4, 7, 8, 14, 19, 20, 22. 23), можна зробити висновок, що при висуванні штока гідроциліндра компенсатора тобто (режим навантаження енергетичного засобу та розвантаження борони) енергетичний засіб навантажується (відповідно рівняння 4 та 14) на значення величини $P \cdot \frac{a}{l} \cdot \sin\alpha$; задні секції борони завантажуються (відповідно до рівнянь 7, 20) на величину $P \cdot \left[\frac{a \cdot d}{b \cdot l} \cdot \sin\alpha + \frac{h}{b} \cdot \cos\alpha\right]$, а передні секції борони розвантажуються (відповідно до рівняння 8,21)на величину $P \cdot \left[\frac{a \cdot (b+d)}{b \cdot l} \cdot \sin\alpha + \frac{h}{b} \cdot \cos\alpha\right]$.

Складемо рівняння рівноваги при русі штока гідроциліндра в зворотному напрямку компенсатора зчіпної ваги в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони, як це показано на рис. 9.

На рис. 9 наведені наступні реакції поверхні: Y_{c2} − реакція сниці у точці C ;N_2 - реакція в зчіпному пристрої МТА;Y_{n2} – реакція передньої частини секції борони у точці її кріплення 2;Y_{32} − реакція задньої частини секції борони в точці її кріплення 3; X_c, X_3- горизонтальні реакції.

Рівняння рівноваги для сниці:

$$\sum M_1 = 0 \; ; -G_c \cdot (l-c) - P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha + Y_{c2} \cdot l = 0 \; ; \quad (24)$$

$$\sum M_c = 0 \; ; -N_2 \cdot l - P \cdot a \cdot \sin\alpha + G_c \cdot c = 0 \; ; \quad (25)$$

При вирішенні рівнянь (24)-(25) отримаємо:

$$Y_{c2} = \frac{G_c \cdot (l-c) + P \cdot (l-a) \cdot \sin\alpha}{l} ; \quad (26)$$

$$N_2 = \frac{-P \cdot a \cdot \sin\alpha + G_c \cdot c}{l} ; \quad (27)$$

Математична модель детермінованого факторного аналізу для N_2 набуває вигляду, як наведено на рис. 10, наступна:

$$N_2(\alpha, P) = -0{,}00005 \cdot \alpha^2 \cdot P + 0{,}00003 \cdot \alpha^2 + \\ +0{,}01 \cdot \alpha \cdot P - 0{,}004 \cdot \alpha - 0{,}1 \cdot P + 0{,}04 \quad (28)$$

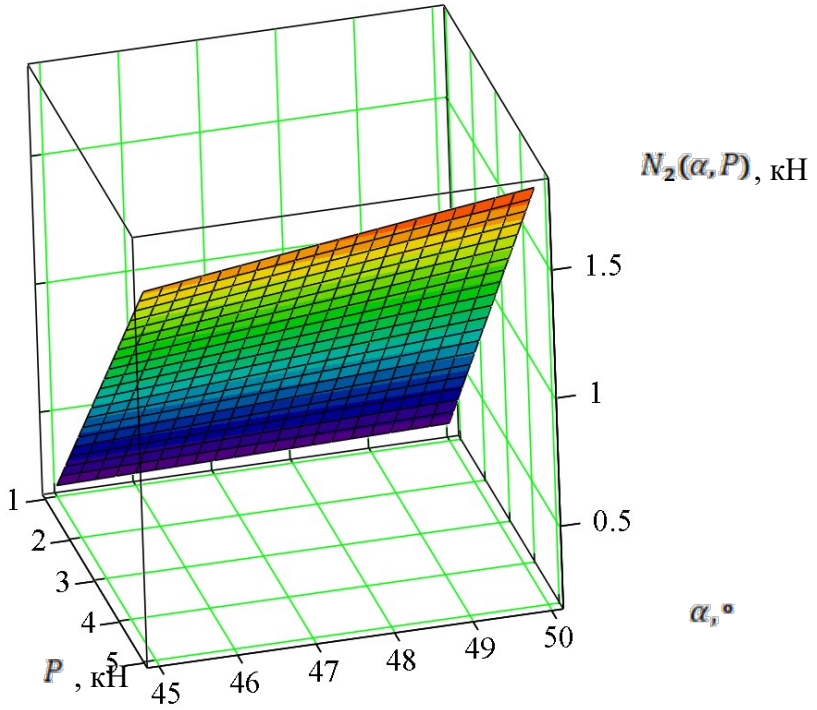


Рисунок 10 – Модель детермінованого факторного аналізу для $N_2(\alpha, P)$ в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони

Джерело: розроблено авторами

Рівняння рівноваги для рами борони набуває наступного вигляду:

$$\sum M_2 = 0 \; ; -P \cdot d \cdot \sin\alpha - P \cdot h \cdot \cos\alpha + Y_{c2} \cdot d + Y_{32} \cdot b - G_b \cdot (f-d) = 0 \quad (29)$$

$$\sum M_3 = 0 \; ; P \cdot (b+d) \cdot \sin\alpha + P \cdot h \cdot \cos\alpha + Y_{c2} \cdot (b+d) -$$

$$-Y_{n2} \cdot b + G_b \cdot (b + d - f) = 0 \; ; \tag{30}$$

Тоді при вирішенні (29)-(30) отримуємо:

$$Y_{32} = \frac{P \cdot d \cdot \sin\alpha + P \cdot h \cdot \cos\alpha - Y_{c2} \cdot d + G_b \cdot (f - d)}{b} \tag{31}$$

$$Y_{n2} = \frac{P \cdot (b + d) \cdot \sin\alpha + P \cdot h \cdot \cos\alpha + Y_{c2} \cdot (b + d) + G_b \cdot (b + d - f)}{b} \tag{32}$$

Або після перетворень:

$$Y_{32} = \frac{P \cdot d \cdot \sin\alpha}{b} + \frac{P \cdot h \cdot \cos\alpha}{b} - \left[\frac{G_c \cdot (l - c) + P \cdot (l - a) \cdot \sin\alpha}{l}\right] \cdot \frac{d}{b} + \frac{G_b \cdot (f - d)}{b} \tag{33}$$

$$Y_{n2} = \frac{P \cdot (b + d) \cdot \sin\alpha}{b} + \frac{P \cdot h \cdot \cos\alpha}{b} + \left[\frac{G_c \cdot (l - c) + P \cdot (l - a) \cdot \sin\alpha}{l}\right] \cdot \frac{(b + d)}{b} + \frac{G_b \cdot (b + d - f)}{b} \tag{34}$$

Математична модель детермінованого факторного аналізу для Y_{32} наведена на рис. 11 і має такий вигляд:

$$Y_{32}(\alpha, P) = e^{-0{,}002 \cdot \alpha} \cdot [-0{,}003 \cdot P^2 + 0{,}5 \cdot P + 0{,}62] \tag{35}$$

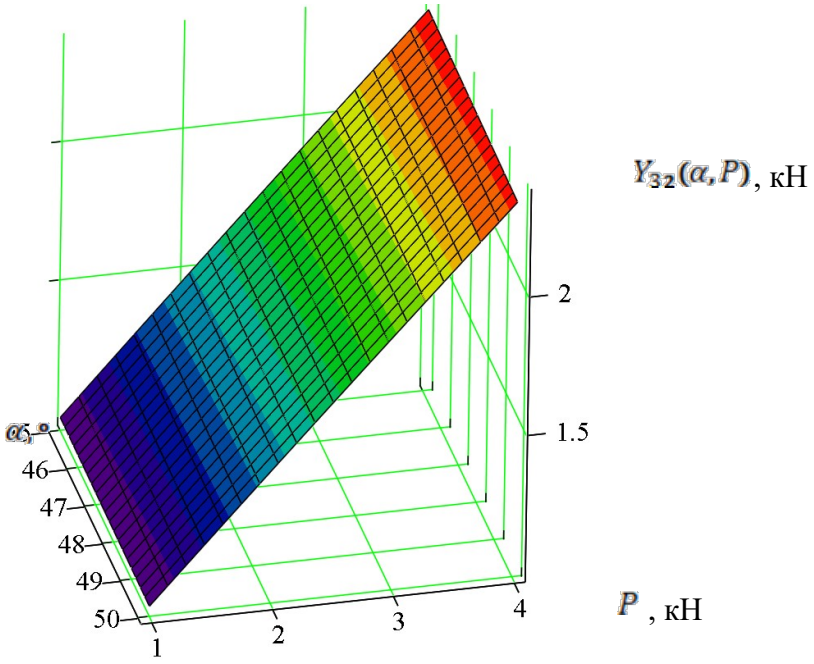


Рисунок 11 – Модель детермінованого факторного аналізу для $Y_{32}(\alpha, P)$ в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони

Джерело: розроблено авторами

Для Y_{n2} рис. 12 має наступний вигляд:

$$Y_{n2}(\alpha, P) = 0{,}002 \cdot \alpha^2 \cdot P + 0{,}0003 \cdot \alpha^2 - 0{,}01 \cdot \alpha \cdot P - -0{,}14 \cdot \alpha - 0{,}24 \cdot P + 13{,}23 \tag{36}$$

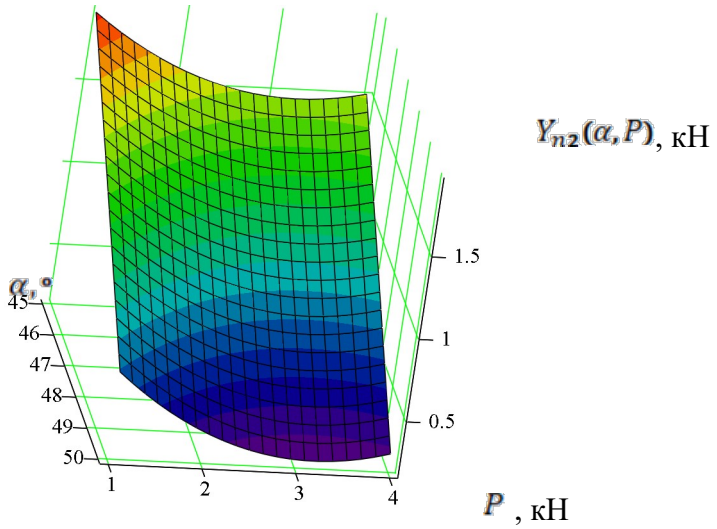


Рисунок 12 – Модель детермінованого факторного аналізу для $Y_{n2}(\alpha, P)$ в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих залежностей (4, 7,8, 24, 29, 30, 34) показує, що при русі в зворотному напрямі штока гідроциліндра компенсатора в режимі розвантаження енергетичного засобу та навантаження борони розвантажується зчіпний пристрій та задні ведучі колеса МТА (відповідно рівняння 4 і 27) на величину $P \cdot \frac{a}{l} \cdot \sin\alpha$, розвантажуються задні секції борони (рівняння 7 і 31) $P \cdot \left[\frac{a \cdot d}{b \cdot l} \cdot \sin\alpha - \frac{h}{b} \cdot \cos\alpha\right]$, завантажуються передні секції борони на $P \cdot \left[\frac{a \cdot (d+b)}{b \cdot l} \cdot \sin\alpha + \frac{h}{b} \cdot \cos\alpha\right]$.

Висновки. У загальному випадку проведений математичний аналіз дозволяє обґрунтувати те, що МТА з встановленим компенсатором зчіпної ваги дозволяє перерозподілити навантаження в складі МТА, що зможе розширити функціональні можливості МТА та стабілізувати стійкість руху асиметричної дискової борони за умов її застосування в фермерських господарствах в ході проведення передпосівного обробітку ґрунту.

Список літератури

1. Асиметрична дискова борона : пат. 99016 Україна : A01B 21/08. № a201013465 ; заявл. 12.11.2010 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
2. Вольський В.А. Математична модель для визначення кута різання при взаємодії сферично-дискового робочого органа з ґрунтом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2011. № 95. С. 80–91.
3. Вольський В.А. Результати досліджень щодо уточнення процесу різання ґрунту сферичним дисковим робочим органом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. № 108. С. 30–36.
4. Горячкін В. П. Общий курс земледельческих машин и орудий. М. : Типолит, Рихтер, 1904. 157 с.
5. Гриценко О.П. Деякі аспекти підвищення ефективності дискових борін. Механізація та електрифікація сільського господарства. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2005. № 93. С. 260–263.
6. Гриценко О. Теоретичні дослідження стійкості руху асиметричної дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2009. № 96. С. 89–100.

7. Гуков Я.С. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.20.01. Глеваха, 1998. 32 с.
8. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко- технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. Київ : Нора-Принт, 1990. 280 с.
9. Дискове ґрунтообробне знаряддя : пат. 90803 Україна : A01B5/00. № a200812975 ; заявл. 25.02.2009 ; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 10.
10. Експериментальні дослідження впливу швидкого руху котка-подрібнювача на якість подбрібнення рослинних решток кукурудзи / Д. В. Богатирьов та ін. *Сільськогосподарські машини*. № 31. С. 10–17.
11. Зубець М., Гуков Я.С., Грицишин М.І. Актуальні проблеми технічної політики в аграрному секторі України. Глеваха : УААН, ННЦ «ІМЕСГ», 2005. 77 с.
12. Лінник М. К., Вольський В.А., Коцюбанський Р. В. До питання щодо прийнятого напрямку різання ґрунту сферичним диском. *Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції в АПК: зб. тез доповідей VII-ї міжн. наук. конфю.* м. Київ, 6 черв. 2019 р. 2019. С. 124–127.
13. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин / А. І. Бойко та ін. Київ, 2003. 203 с.
14. Теорія стійкого руху дискової борони / В. В. Адамчук et al. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. No. 14(113). P. 10–22. https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-1
15. A Mathematical Model of the Plane-Parallel Movement of an Asymmetric Machine-and-Tractor Aggregate / V. Bulgakov et al. *Agriculture*. 2018. Vol. 8, no. 10. P. 151. https://doi.org/10.3390/agriculture8100151
16. Study of the traction properties of agricultural gantry systems / V. Bulgakov et al. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. No. XXXI. P. 10–16.
17. Design of a roll crusher for sunflower stems and substantiation of the rational modes of its operation / V. Sheichenko et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, no. 1 (114). P. 28–37. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244903
18. Experimental Investigation of Plow-Chopping Unit / V. Bulgakov et al. *Agriculture*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 30.: https://doi.org/10.3390/agriculture11010030
19. Experimental investigations in draft resistance of spherical working tool of disk harrow / В. М. Булгаков et al. *Engineering Rural Device*. 2019. No. 18. P. 144–152.
20. Nadykto V., Arak M., Olt J. Theoretical research into the frictional slipping of wheel-type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy research*. 2015. No. 13. P. 148–157.
21. Nadykto V., Ivanovs V., Kistechok O. Investigation of the draft-and-power, and agrotechnical indicators of the work of a ploughing aggregate, created according to the scheme ‘push-pull’. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2017. No. 62. P. 136–139.

References

1. Hrytsenko, O. P., Hukov, Ya. S., Sachenko, V. I., & Moiseienko, V. K. (2012). *Patent Ukrainy № 99016*.
2. Volskyi, V. A. (2011). Matematychna model dlia vyznachennia kuta rizannia pry vzaiemodii sferychno-dyskovoho robochoho orhana z gruntom. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, (95), 80–91.
3. Volskyi, V. A. (2019). Rezultaty doslidzhen shchodo utochnennia protsesu rizannia gruntu sferychnym dyskovym robochym orhanom. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, (108), 30–36.
4. Horiachkin, V. P. (1904). *Obshchyi kurs zemledelcheskykh mashyn y orudyi*. M.: Typolyt, Rykhter.
5. Hrytsenko, O. P. (2005). Deiaki aspekty pidvyshchennia efektyvnosti dyskovykh borin. Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, (93), 260–263.
6. Hrytsenko, O. (2009). Teoretychni doslidzhennia stiikosti rukhu asymetrychnoi dyskovoi borony. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, (96), 89–100.
7. Hukov, Ya. S. (1998). *Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia enerhozberihaiuchykh zasobiv dlia mekhanizatsii obrobitku gruntu v umovakh Ukrainy* (Masters Thesis).
8. Hukov, Ya. S. (1990). *Obrobitok gruntu. Tekhnolohiia i tekhnika. Mekhaniko- tekhnolohichne obgruntuvannia enerhozberihaiuchykh zasobiv dlia mekhanizatsii obrobitku gruntu v umovakh Ukrainy*. Kyiv: Nora-Prynt.
9. Hukov, Ya. S., Hrytsenko, O. P., Volskyi, V. A., Dudak, S. M., Polovyi, B. P., Hovorov, O. F., & Lysyi, O. O. (2010). *Patent Ukrainy № 90803*.

10. Bohatyrov, D. V., Salo, V. M., Leshchenko, S. M., & Machok, Yu. V. (b. d.). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu shvydkoho rukhu kotka-podribniuvacha na yakist podbribnennia roslynnykh reshtok kukurudzy. *Silskohospodarski mashyny*, (31), 10–17.
11. Zubets, M., Hukov, Ya. S., & Hrytsyshyn, M. I. (2005). *Aktualni problemy tekhnichnoi polityky v ahrarnomu sektori Ukrainy*. Hlevakha: UAAN, NNTs «IMESH».
12. Linnyk, M. K., Volskyi, V. A., & Kotsiubanskyi, R. V. (2019). Do pytannia shchodo pryiniatoho napriamku rizannia hruntu sferychnym dyskom. U *Zbirnyk tez dopovidei VII-yi mizhnarodnoi naukovoi konferentsii «Innovatsiine zabezpechennia vyrobnytstva orhanichnoi produktsii v APK»* (s. 124–127).
13. Boiko, A. I., Sviren, M. O., Shmat, S. I., & Nozhnov, M. M. (2003). *Novi konstruktsii gruntoobrobnykh ta posivnykh mashyn*. Kyiv.
14. Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Nadykto, V. I., Kuvachov, V. P., Ihnatev, Ye. I., & Olt, Yu. (2021). Teoriia stiikoho rukhu dyskovoi borony. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, (14(113)), 10–22. 2189-2021-14-1doi:10.37204/0131
15. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Nadykto, V., & Ivanovs, S. (2018). A Mathematical Model of the Plane-Parallel Movement of an Asymmetric Machine-and-Tractor Aggregate. *Agriculture*, *8*(10), 151. doi:10.3390/agriculture8100151
16. Bulgakov, V., Olt, J., Kuvachov, V., & Smolitsky, S. (2020). A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*, (XXXI), 10–16.
17. Sheichenko, V., Volskyi, V., Kotsiubanskyi, R., Dnes, V., Shevchuk, M., Bilovod, O., & Drozhchana, O. (2021). Design of a roll crusher for sunflower stems and substantiation of the rational modes of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6*(1 (114)), 28–37. 4061.2021.244903doi:10.15587/1729
18. Bulgakov, V., Aboltins, A., Beloev, H., Nadykto, V., Kyurchev, V., Adamchuk, V., & Kaminskiy, V. (2021). Experimental Investigation of Plow-Chopping Unit. *Agriculture*, *11*(1), 30. doi:10.3390/agriculture11010030
19. Bulhakov, V. M., Pascuzzi, S., Ivanovs, S., & Volskyi, V. (2019). Experimental investigations in draft resistance of spherical working tool of disk harrow. *Engineering Rural Device*, (18), 144–152.
20. Nadykto, V., Arak, M., & Olt, J. (2015). Theoretical research into the frictional slipping of wheel-type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy research*, (13), 148–157.
21. Nadykto, V., Ivanovs, V., & Kistechok, O. (2017). Investigation of the draft-and-power, and agrotechnical indicators of the work of a ploughing aggregate, created according to the scheme 'push-pull'. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, (62), 136–139.

Serhii Stepanenko, DSc., Senior Researcher, **Oleksandr Hrytsenko,** Researcher
Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Glevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Stability of Movement of Asymmetric Disc Harrow

The production necessity to expand the functional capabilities of farm machinery and tractor units (MTUs), being the most demanded in small farms due to their high energy intensity, reliability, and versatility in the production of agricultural products, is an important task that requires the application of new methodological, practical approaches, and relevant design solutions.

This article discusses the application of a hitch weight compensator, installed on the frame and plow of an asymmetric disc harrow, as one of the ways to rationally redistribute the hitch weight within the MTU during pre-sowing soil tillage. The mathematical justification is provided for improving the stability of the movement of an asymmetric disc harrow and the use of wide-span agricultural units, which allows increasing the productivity of their application and reducing temporary and energy costs for pre-sowing soil cultivation.

In the general case, the performed mathematical analysis allows you to justify the fact that the MTA with an installed hitch weight compensator allows you to redistribute the load in the MTA composition, which will be able to expand the functional capabilities of the MTA and stabilize the stability of the movement of the asymmetric disc harrow under the conditions of its use in farms during pre-sowing soil cultivation.

asymmetric disc harrow, energy tool, MTU (machine and tractor unit), hitch weight, redistribution, compensator

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.20

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.316.022 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.51-65

Г.В. Теслюк, доц., канд. техн. наук, **Е.Б. Алієв,** проф., д-р техн. наук, **Ю.В. Теслюк,** д-рка філософії
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail:aliev@meta.ua

Техніко-економічне обґрунтування геометричних параметрів біонічних культиваторних лап на основі морфології риб

Метою досліджень є проведення геометричного розрахунку біонічних культиваторних лап на основі морфології риб та побудова їх тривимірних моделей.

У результаті аналізу морфології і локомоції риб та обробки їх фотозображення з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV та методів зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію зовнішнього і внутрішнього контурів хвостового плавника деяких риб. У результаті аналітичних досліджень проведено геометричний розрахунок рівнянь регресії опуклого і увігнутого зовнішнього контуру біонічних культиваторних лап на основі морфології хвостового плавника риби та побудовані їх тривимірні моделі в SolidWorks.

культиваторна лапа, ґрунт, біоніка, морфологія, риби, хвостовий плавник, зворотній інжиніринг, проєктування, аналіз, методика

Постановка проблеми. Культиваторні лапи можна умовно віднести до групи робочих органів, поверхня яких виконує функції розпушування і переміщування агрегатів ґрунту в межах їх геометричних розмірів [1].

Більшість наукових праць [2–5] досліджують поверхню робочого органу, що обробляє ґрунт, з огляду на мінімізацію тягового опору. Деякі автори [7–9] досліджують взаємозв'язок бічного профілю лапи з якістю обробки ґрунту. В їхніх дослідженнях найкращі результати досягаються завдяки поверхні, що створює зони локальних зсувів у ґрунті. Ця форма поверхні відповідає розподілу тиску, що найбільше схожий на коло або криву другого порядку.

Останнім часом тривають дискусії щодо оптимальної форми поверхні розпушувальної лапи. Варіанти включають опуклі та увігнуті лемеші в горизонтальних і вертикальних площинах, представлені у вигляді дуг різних радіусів кривизни. У теоретичному відношенні розглядається взаємодія робочого органу для розпушування з ґрунтом, щоб обґрунтувати його геометричні параметри з точки зору енергетичних та якісних характеристик роботи. Якість роботи розпушувального органу оцінюється за ступенем розпушення ґрунту на агрегати фракції розміром не більше 50 мм і відсутністю значного ущільнення окремих його елементів [2].

Як зазначається у [1, 4, 6], ґрунтообробний робочий орган визначається значною кількістю параметрів, так як його поверхня, перш за все, являє собою геометричний об’єкт. Всі параметри, які приймають участь в проєктуванні ґрунтообробного робочого органу, можна поділити на наступні групи:

– технологічні, які визначаються технологією вирощування культур або обробітком ґрунту (глибина обробітку, розпушування ґрунту, вирівнювання дна борозни, знищення бур’янів, заробка рослинних решток тощо);

© Г.В. Теслюк, Е.Б. Алієв, Ю.В. Теслюк, 2023

– параметри ґрунту, які визначають його фізико-механічні властивості на момент обробітку (коефіцієнт внутрішнього тертя, коефіцієнт зовнішнього тертя, агрегатний склад ґрунту, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, робота сил адгезії, яка залежить від вологості і типу ґрунту тощо);

– параметри рослин, з якими взаємодіє робочий орган (коефіцієнт тертя рослин по сталі, коефіцієнт тертя рослин по ґрунту, зв'язність дерні, границя міцності дерні тощо);

– параметри поверхні робочого органу, які визначають його конструкцію (кривина поверхні, габаритні геометричні розміри, параметри леза тощо).

Стандартна узагальнена методика проєктування поверхонь робочих органів зводиться до наступних дій [1, 4]:

– задання технологічних параметрів;

– визначення параметрів ґрунту і рослин;

– вибір параметрів поверхонь в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту;

– обчислення координат напрямної поверхні;

– формування каркасу поверхні;

– побудова обрізу поверхонь;

– побудова шаблонів вертикальними і горизонтальними січними площинами.

Такий концептуальний підхід на сьогодні є застарілий через появу великої кількості CAD і CAE-систем, що дозволяють системно проєктувати нові ґрунтообробні робочі органи.

Окрім цього, набуває розвитку застосування біоніки [7, 9–11] при проєктуванні ґрунтообробних робочих органів, що є більш ефективним за свої традиційні аналоги. Біонічні робочі органи спираються на морфологію і локомоцію ґрунтової і водної фауни.

Тому вирішення проблеми співставлення морфології ґрунтової і водної фауни з поверхнею ґрунтообробних робочих органів є актуальним і потребує вирішенню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Провівши аналіз літературних джерел, виявлено, що найбільш схожою на процес взаємодії культиваторної лапи із ґрунтом є локомоція риб, які використовую власну форму тіла і наявність допоміжних елементів (плавників) для переміщення у водному середовищі.

Отримані дані досліджень [12–14] дали змогу на основі факторного аналізу оцінити морфологічні особливості риб і їх поліморфізм.

Так в роботі [14] на основі багаторічних статистичних даних виявлено приховану структуру морфології берша (Stizostedion Volgensis).

В роботі [12] отримані функціональні зв'язки між морфологією річкових риб та їх гідродинамічними здібностями. Досліджено потенційні залежності між мінімальними коефіцієнтами лобового опору, використанням швидкостей, морфологією риби та опором у заданій течії.

В роботі [13] розглянуті гідродинамічні характеристики риби-вітрильника (*Istiophorus platypterus*) і риби-меч (*Xiphias gladius*) в планерних позах на їх крейсерських швидкостях.

В роботі [14] розглянута морфологія та експериментальна гідродинаміка поверхонь управління плавниками риб.

Також в деяких наукових роботах проведене чисельне моделювання локомоції риб у водному середовищі. У статті [15] на основі CFD моделювання досліджено гідродинаміку плавців із трьома хвостовими плавцями: круглим, що відповідає змієголовій рибі (*Channidae*), заглибленим, що відповідає сайді (*Pollachius virens*), і

місячним, що відповідає тунцю (*Thunnus thynnus*). В дослідженнях [16] тіло риби функціонує як аеродинамічне крило: поверхневий тиск генерує тягу під час карангіформної локомоції.

Широке розповсюдження має робототехніка на основі біоніки риб. В статті [17] проведено огляд моделювання, матеріалів і приводів водних безпілотних транспортних засобів на основі біоніки водної фауни. В роботі [18] проведені дослідження впливу складного рельєфу на гідродинамічні характеристики глибоководного рибоподібного робота-дослідника для відбору проб, що рухається поблизу морського дна.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про велике різноманіття форм тіла риб, які можна згрупувати і використати в якості характеристичної поверхні лапи культиватора.

Постановка завдання. Провести геометричний розрахунок біонічних культиваторних лап на основі морфології риб та побудувати їх тривимірні моделі.

Виклад основного матеріалу. Аналіз літературних джерел [7, 15, 19–21] щодо морфології риб дозволяє їх узагальнити у вигляді форм, які наведені на рис. 1.

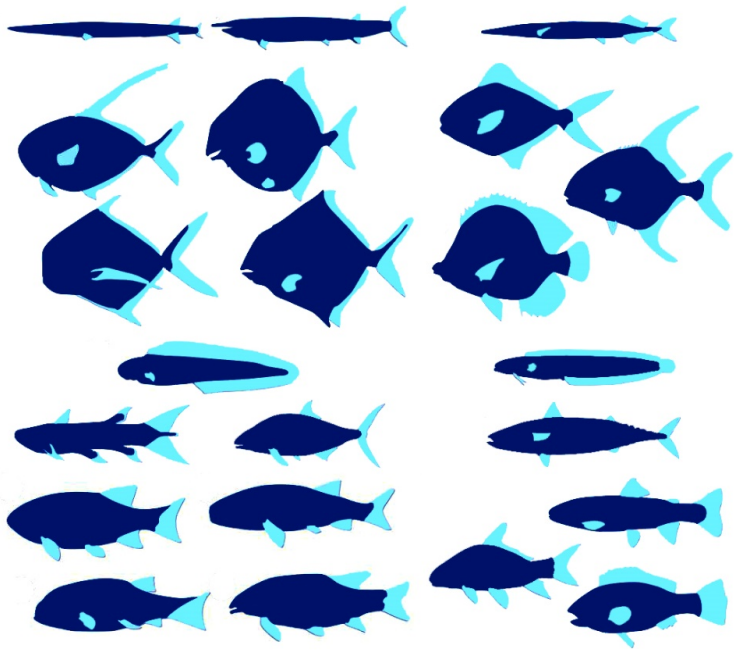


Рисунок 1 – Узагальнені структура морфології риб

Джерело: за даними [7, 15, 19–21]

Особливий інтерес в будові тіла риби при проєктуванні поверхні лапи культиватора має хвостовий плавник. Обробку фотозображення плавників проведено з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV. Для визначення рівняння контуру хвостового плавника риби в розробленій програмі виконується наступна послідовність дій (рис. 2). На першому етапі відбувається завантаження фотозображення хвостового плавника і вибір відповідної прямокутної області. Другим етапом є перетворення зображення у бінарний вид (чорно-біле зображення), використовуючи методи сегментації. Подальше усунення шумів і пропусків з використанням функцій Erode і Dilate бібліотеки OpenCV. На третьому етапі визначаються контури чорних областей, використовуючи функції FindContour бібліотеки OpenCV (перетворення Хафа і детектор границь Кенні). Програма в автоматичному режимі знаходить контур хвостового плавника і надає його координати для наступного аналізу.

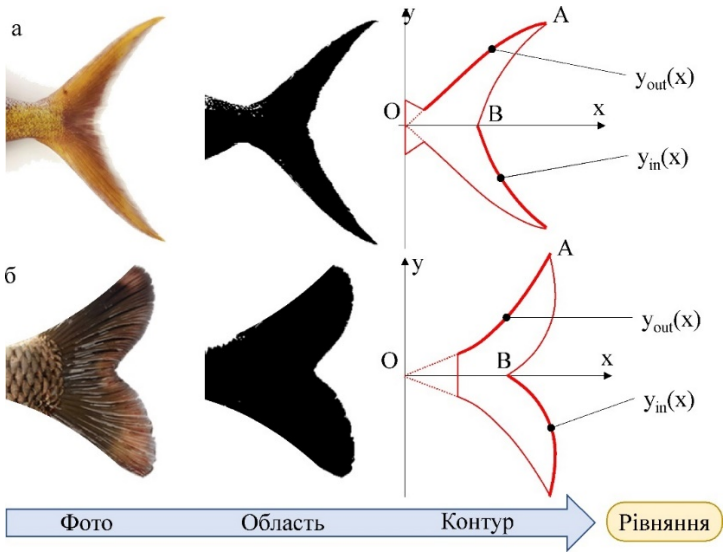


Рисунок 2 – Етапи обробки фотозображення хвостового плавника риби
Джерело: розроблено авторами

Використовуючи методи зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію хвостових плавників деяких риб. Особлива увага приділена результатам досліджень. В загальному вигляді зовнішній і внутрішній контури хвостового плавника можна апроксимувати наступним чином:

$$\begin{cases} y_{out} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \\ y_{in} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2, \end{cases} \quad (1)$$

де x, y – декартові координати, мм;

$y_{out}(x)$, $y_{in}(x)$ – рівняння зовнішнього і внутрішнього контурів, мм;

a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти регресії рівнянь.

Подальший аналіз рівнянь (1) зводиться до визначення коефіцієнтів регресії.

Перш за все приймаємо, що зовнішній контур перетинає початок координат O (0, 0). Тоді коефіцієнт $a_0 = 0$. По-друге, приймаємо ширину лапи W = 330 мм і довжину L = 230 мм (за умови подібності до звичайної 330 стрілчастої лапи) – точка A. Тоді маємо наступну умову для точки A (– L, W/2):

$$\begin{cases} y_{out}(-L) = -a_1 L + a_2 L^2 = \dfrac{W}{2}, \\ y_{in}(-L) = b_0 - b_1 L + b_2 L^2 = \dfrac{W}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Згідно спостережень за даними морфології хвостових плавників, точка B у більшості випадків знаходиться посередині довжини L. Тоді умовою для точки B (– L/2, 0) є:

$$y_{in}\left(-\frac{L}{2}\right) = b_0 - b_1 \frac{L}{2} + b_2 \frac{L^2}{4} = 0. \quad (3)$$

Також наочно виявлено, що внутрішній контур у більшості випадків повторює зовнішній, зменшений у два рази. Математично це можна записати наступним чином:

$$y_{in}(x) = y_{out}\left(2x + L\right) \Rightarrow$$
$$b_0 + b_1 x + b_2 x^2 = a_1\left(2x + L\right) + a_2\left(2x + L\right)^2, \quad (4)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2)–(4) отримуємо

$$\begin{cases} b_0 = a_1 L + a_2 L^2, \\ b_1 = 2a_1 + 4a_2 L, \\ b_2 = 4a_2. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_{out} = a_1 x + a_2 x^2, \\ y_{in} = a_1 L + a_2 L^2 + (2a_1 + 4a_2 L) x + 4a_2 x^2, \end{cases} \quad (5)$$

Цікавим є те, що при $a_2 = 0$ отримуємо форму звичайної стрілчастої лапи:

$$\begin{cases} y_{out} = \dfrac{W}{2L} x \approx 0,717x, \\ y_{in} = -\dfrac{W}{2} + \dfrac{W}{L} x \approx -165 + 1,434x. \end{cases} \quad (6)$$

Для повної побудови тривимірної поверхні культиваторної лапи необхідно враховувати рівняння напрямної поверхні, яку згідно досліджень [1, 4, 22] можна представити у вигляді логарифмічної спіралі (рис. 3):

$$\begin{cases} z = z_C - r_0 e^{\varphi \operatorname{tg}\theta} \sin(\varphi_k - \varphi), \\ x = x_C + \dfrac{r_0}{2} e^{\varphi \operatorname{tg}\theta} \cos(\varphi_k - \varphi), \\ 0 \le \varphi \le \varphi_k, \end{cases} \quad (7)$$

де x, z – декартові координати, мм;

$x_C = -x(0)$, $z_C = -z(0)$ – координати центра спіралі, мм;

φ – кут полярної системи координат, рад;

φ_k – кінцевий полярний кут полярної, рад;

θ – кут внутрішнього тертя, рад;

$r_0 = \dfrac{W/2}{\sin \varphi_k}$ – початковий радіус-вектор, мм.

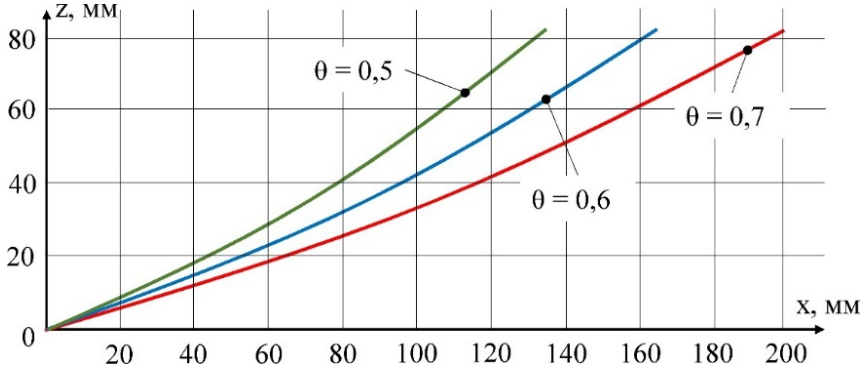


Рисунок 3 – Форма напрямної поверхні культиваторної лапи

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи рівняння (5) і (7), остаточно маємо рівняння зовнішньої поверхні (однієї з симетричних частин) лапи культиватора S(x, y, z):

$$\begin{cases} x = \rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right), \\ y = a_1\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right)\right) + a_2\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right)\right)^2, \\ z = z_C - r_0 e^{\varphi tg\theta} \sin\left(\varphi_k - \varphi\right), \\ 0 \le \varphi \le \varphi_k, \\ 0 \le \rho \le \dfrac{W}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

де ρ – змінна, мм.

Графік залежності контурів звичайної стрілчастої лапи (при $\varphi_k = \pi/8$ рад., $\theta = 0,7$ рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведена на рис. 4.

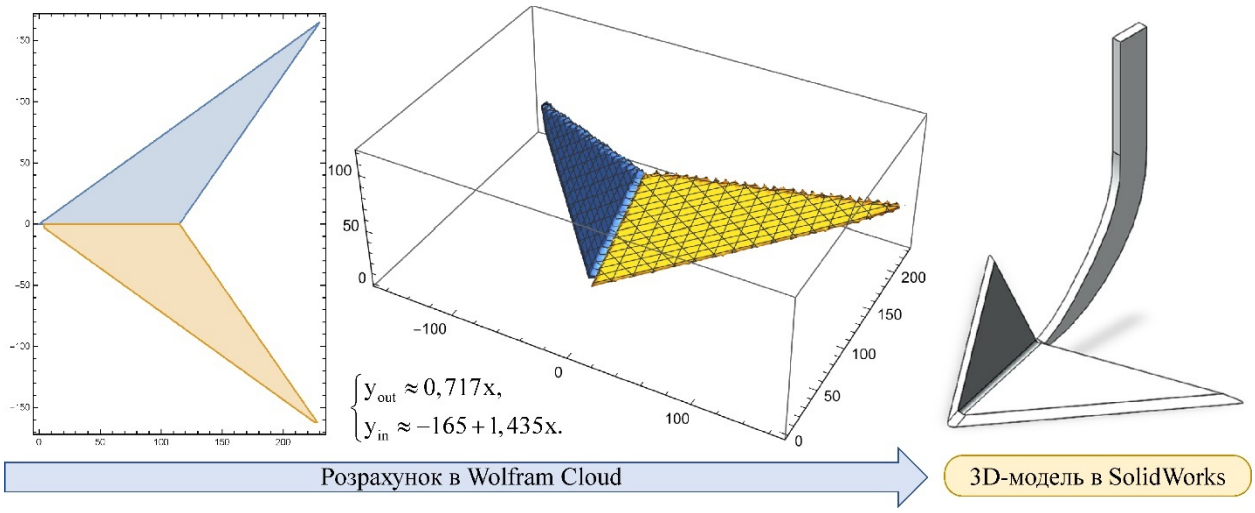


Рисунок 4 – Візуалізація звичайної стрілчастої лапи

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи рівняння (2), виявлено, що при $a_2 < 0$ контур лапи культиватора схожий на хвостовий плавник риби, як на рис. 2, а. В свою чергу, якщо $a_2 > 0$, то контур лапи культиватора подібний на хвостовий плавник риби, як на рис. 2, б. Тому в подальшому будемо розглядати саме два варіанти.

В процесі переміщення лапи культиватора зі швидкістю V перше рівняння системи (8) приймає вигляд:

$$\begin{cases} x' = \rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right) - Vt, \\ y' = a_1\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right) - Vt\right) + \\ + a_2\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta} \cos\left(\varphi_k - \varphi\right) - Vt\right)^2, \\ z' = z_C - r_0 e^{\varphi tg\theta} \sin\left(\varphi_k - \varphi\right), \\ 0 \le \varphi \le \varphi_k, \\ 0 \le \rho \le \dfrac{W}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

де V – швидкість переміщення лапи культиватора, м/с; t – час, с.

Для обґрунтування раціональних коефіцієнтів регресії рівняння (8), що визначають форму поверхні культиваторної лапи, яка є найбільш раціональною для виконання умови руйнування ґрунтового середовища необхідно теоретично дослідити його напружено-деформований стан. Теоретичні дослідження цього стану зводяться до складання узагальнених закономірностей: рівняння рівноваги, законів, що зв'язують напруження і відносні деформації тощо [23]. Причому взаємозв'язок напруження і відносних деформацій визначає механічну модель ґрунтового середовища. Найбільш цікавою є модель пружно-в'язко-пластичного середовища.

В роботі [24] детально розглянуто процес визначення фізичних рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформацій для ґрунтового середовища. Тому немає сенсу його повторювати і в подальших дослідженнях використаємо остаточне рівняння:

$$
\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{2}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(2\dot{\varepsilon}_x-\dot{\varepsilon}_y-\dot{\varepsilon}_z\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right),\\
\sigma_y &= \frac{2}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(2\dot{\varepsilon}_y-\dot{\varepsilon}_x-\dot{\varepsilon}_z\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right),\\
\sigma_z &= \frac{2}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(2\dot{\varepsilon}_z-\dot{\varepsilon}_y-\dot{\varepsilon}_x\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right),\\
K_2 &= \frac{27l\left(-1+2\nu\right)\left(\tau_0\cos\theta+\frac{2e^{K_1}\mu(1+\nu)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)\sin\theta}{9-18\nu}\right)}{4\sqrt{2}\mu(1+\nu)\sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}}\left(-3+\sin\theta\right)},\\
K_1 &= \frac{3El}{(2\mu+2\mu\nu)\sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}}},
\end{aligned}
\qquad (10)
$$

де σ_x, σ_y, σ_z – нормальне напруження опору ґрунтового середовища, Па;

ε_x, ε_y, ε_z – компоненти відносної деформації в нормальному напрямку;

μ – коефіцієнт в'язкості зсувних деформацій, Па·с;

ν – коефіцієнт Пуассона;

l – відстань, на якій затухає хвиля напружень у даному середовищі, м;

θ – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу (ґрунту), рад;

E – модуль пружності лінійних деформацій, Па;

ρ – щільність середовища, кг/м^3.

Для доповнення рівнянь (10) скористаємось критерієм Кулона-Мора, який заснований на припущенні, що міцність залежить, головним чином, від величини та знаку головних напруг. Якщо при деяких напругах виникає плинність, то коло Мора, побудоване на цих напругах, відповідає граничному стану матеріалу. Тривимірний критерій Кулона-Мора часто виражається як

$$\begin{cases} \pm\dfrac{\sigma_x-\sigma_y}{2}=\left[\dfrac{\sigma_x+\sigma_y}{2}\right]\sin\theta+C_0\cos\theta, \\ \pm\dfrac{\sigma_y-\sigma_z}{2}=\left[\dfrac{\sigma_y+\sigma_z}{2}\right]\sin\theta+C_0\cos\theta, \\ \pm\dfrac{\sigma_z-\sigma_x}{2}=\left[\dfrac{\sigma_z+\sigma_x}{2}\right]\sin\theta+C_0\cos\theta, \end{cases} \tag{11}$$

де C_0 – коефіцієнт зчеплення ґрунтового середовища, Па.

Підставляючи (10) в (11), маємо:

$$\begin{aligned} &\pm\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(3\dot{\varepsilon}_x-3\dot{\varepsilon}_y\right)\right)- \\ &-\left[\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y-2\dot{\varepsilon}_z\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right)\right]\sin\theta=C_0\cos\theta, \\ &\pm\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(3\dot{\varepsilon}_y-3\dot{\varepsilon}_z\right)\right)- \\ &-\left[\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z-2\dot{\varepsilon}_x\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right)\right]\sin\theta=C_0\cos\theta, \\ &\pm\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(3\dot{\varepsilon}_z-3\dot{\varepsilon}_x\right)\right)- \\ &-\left[\frac{1}{9}\mu\left(3e^{\frac{2K_2(1+\nu)}{3(-1+2\nu)}}\left(\dot{\varepsilon}_z+\dot{\varepsilon}_x-2\dot{\varepsilon}_y\right)-\frac{e^{K_2}\left(1+\nu\right)\left(\dot{\varepsilon}_x+\dot{\varepsilon}_y+\dot{\varepsilon}_z\right)}{-1+2\nu}\right)\right]\sin\theta=C_0\cos\theta, \end{aligned} \tag{12}$$

Також слід відмітити, що три компонента деформації в кожній точці ґрунтового середовища повністю визначаються трьома функціями компонентів переміщення. Відповідно до цього компоненти відносної деформації повинні підпорядковуватися наступним співвідношенням [23]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x=\dfrac{x'-x}{x}=\dfrac{-Vt}{\rho+x_C+0,5r_0e^{\varphi tg\theta}\cos\left(\varphi_k-\varphi\right)}, \\ \varepsilon_y=\left(y'-y\right)/y=-1+ \\ +\dfrac{a_1\left(\rho+x_C+0,5r_0e^{\varphi tg\theta}\cos\left(\varphi_k-\varphi\right)-Vt\right)+a_2\left(\rho+x_C+0,5r_0e^{\varphi tg\theta}\cos\left(\varphi_k-\varphi\right)-Vt\right)^2}{a_1\left(\rho+x_C+0,5r_0e^{\varphi tg\theta}\cos\left(\varphi_k-\varphi\right)\right)+a_2\left(\rho+x_C+0,5r_0e^{\varphi tg\theta}\cos\left(\varphi_k-\varphi\right)\right)^2}, \\ \varepsilon_x=\left(z'-z\right)/z=0. \end{cases} \tag{13}$$

де x`– x, y`– y, z`– z – компоненти переміщення вздовж осей Ox, Oy, Oz відповідно, м.

Знайдемо швидкості зміни компонентів відносної деформації:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_x = \dfrac{-V}{\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta}\cos(\varphi_k - \varphi)}, \\ \dot{\varepsilon}_y = \dfrac{-Va_1 - 2Va_2\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta}\cos(\varphi_k - \varphi) - Vt\right)}{a_1\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta}\cos(\varphi_k - \varphi)\right) + a_2\left(\rho + x_C + 0,5r_0 e^{\varphi tg\theta}\cos(\varphi_k - \varphi)\right)^2}, \\ \dot{\varepsilon}_x = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Підставляючи (14) у (12) і вирішуючи отриману систему рівнянь в програмному пакеті Wolfram Cloud для прийнятих властивостей ґрунтового середовища (μ = 102 кПа·с; ν = 0,41; l = 0,4 м; θ = 0,7 рад; E – $1,5\cdot10^7$ Па; ρ – 1270 кг/м^3 [24]), отримані значення коефіцієнтів регресії: a_1 = 1,451, a_2 = –0,00319 і a_1 = 0,423, a_2 = 0,00128.

Тоді рівняння контурів лапи культиватора для опуклого варіанту (рис. 2, а) мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} y_{out} \approx 1,451x - 0,00319x^2, \\ y_{in} \approx -502,5 + 5,837x - 0,01276x^2. \end{cases} \quad (15)$$

Графік залежності контурів опуклої стрілчастої лапи (при $\varphi_k = \pi/8$ рад., θ = 0,7 рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведена на рис. 5.

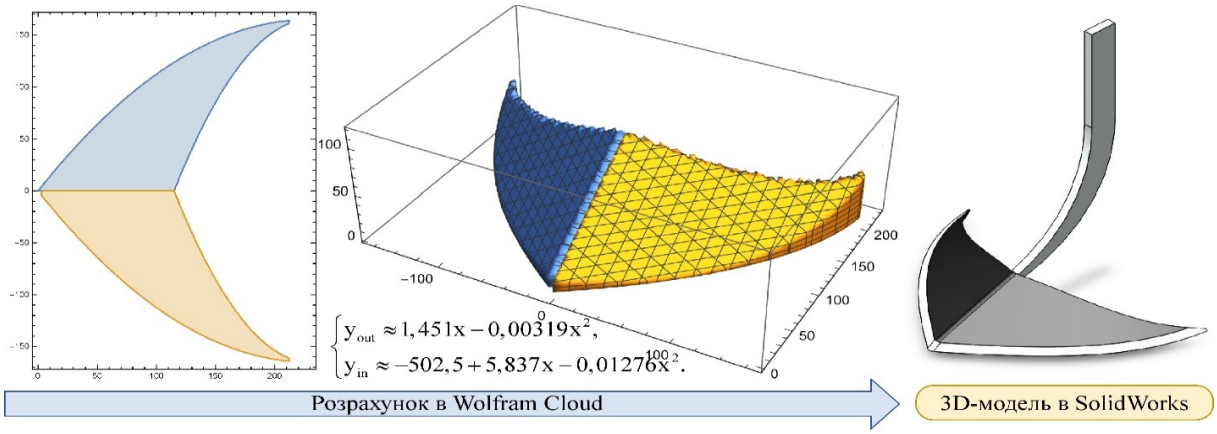


Рисунок 5 – Візуалізація опуклої стрілчастої лапи

Джерело: розроблено авторами

Рівняння контурів лапи культиватора для увігнутого варіанту (рис. 2, б) мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} y_{out} \approx 0,423x - 0,00128x^2, \\ y_{in} \approx -29,663 - 0,3305x - 0,005117x^2. \end{cases} \quad (16)$$

Графік залежності контурів увігнутої стрілчастої лапи (при $\varphi_k = \pi/8$ рад., θ = 0,7 рад.) в програмному пакеті Wolfram Cloud і відповідна 3D-модель в SolidWorks наведені на рис. 6.

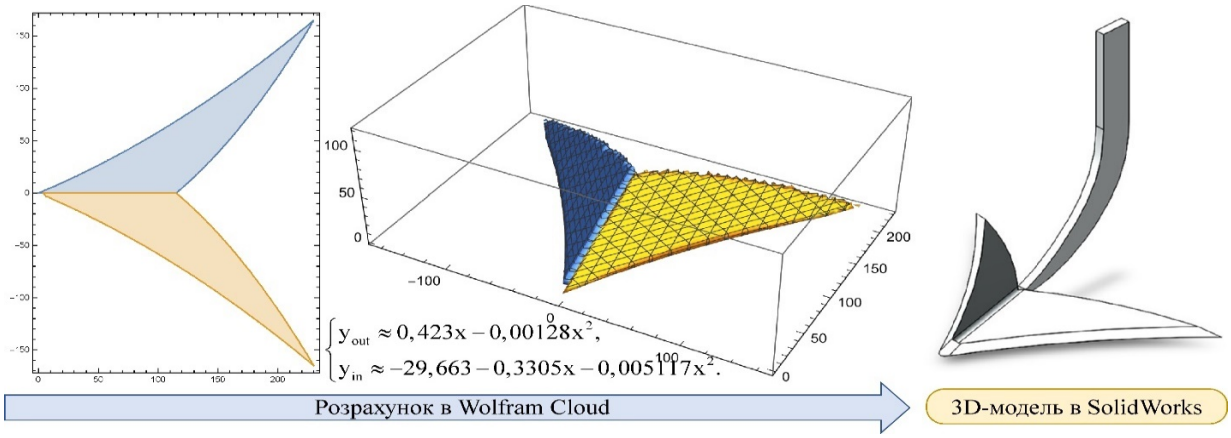


Рисунок 6 – Візуалізація увігнутої стрілчастої лапи

Джерело: розроблено авторами

При аналізі морфології хвостових плавників помічено цікавий елемент – їх промені (радіалії). Вони розташовані вздовж осьової лінії хвостового плавника зі зміщенням на зовнішній контур (рис. 7) та виконують додаткову функцію локомоції і зменшують гідродинамічний опір при русі. Тому окрім форми контурів стрілчатої лапи культиватора доцільно використовувати подібні промені на її зовнішній поверхні.

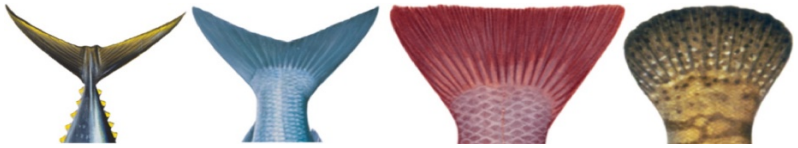


Рисунок 7 – Промені (радіалії) на різних типах хвостових плавників

Джерело: за даними [7, 15, 19–22]

Аналізуючи морфологію хвостового плавника багатьох риб, встановлено загальну закономірність їх розташування, яку можна представити у вигляді рівняння:

$$\begin{cases} y_{out} = a_1 x + a_2 x^2, \\ y_{N-1} = (N-1)\left(a_1 x + a_2 x^2\right)/N, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ y_i = i\left(a_1 x + a_2 x^2\right)/N, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, \\ y_1 = 1\left(a_1 x + a_2 x^2\right)/N, \end{cases} \quad (17)$$

де N – загальна кількість променів;

i – порядковий номер променя.

Загальну кількість променів обрано з наступних міркувань. Розпушувальна лапа культиватора працює на глибині 8–16 см. Згідно досліджень [2] на цій глибині оптимальний агрегатний склад ґрунту становить 10–20 мм. Тому для вільного переміщення агрегату ґрунту розміром 20 мм вздовж поверхні лапи культиватора відстань між променями також повинна складати в середньому 20 мм. Тоді на одній половині культиваторної лапи кількість відповідних жолобків між променями повинна складати N = (W/2)/20 = (330/2)/20 ≈ 8 шт.

Побудуємо відповідні моделі культиваторних лап із направляючими променями в програмних пакетах Wolfram Cloud і SolidWorks (рис. 8–10).

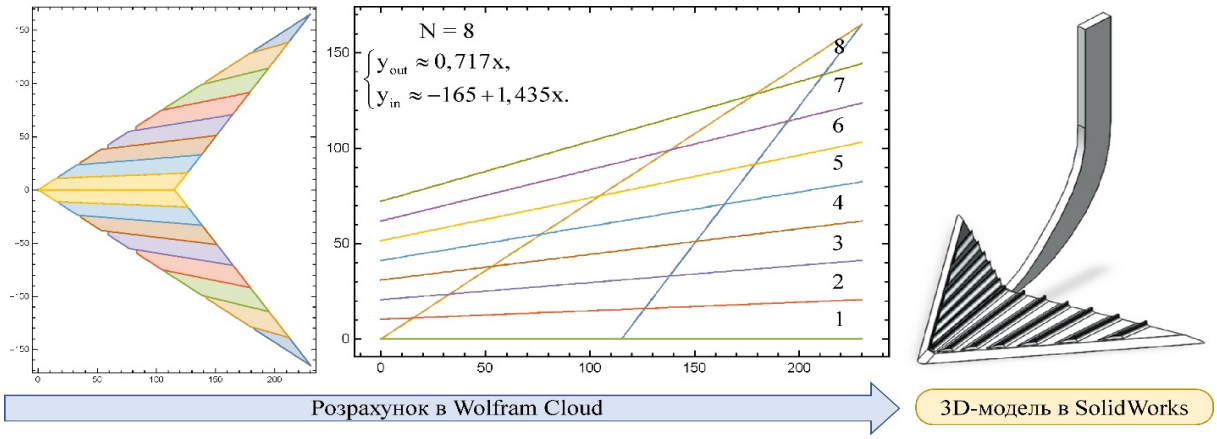


Рисунок 8 – Візуалізація звичайної стрілчастої лапи із направляючими променями
Джерело: розроблено авторами

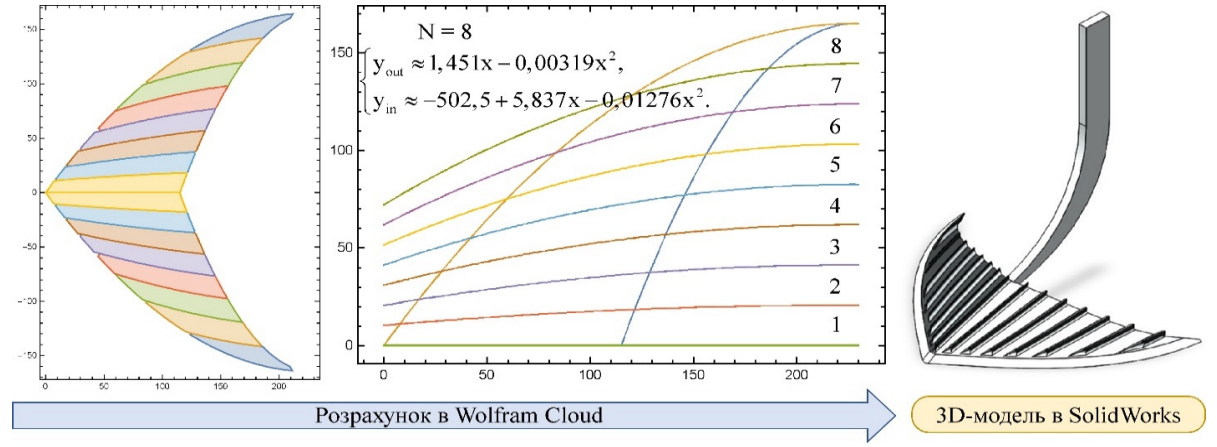


Рисунок 9 – Візуалізація опуклої стрілчастої лапи із направляючими променями
Джерело: розроблено авторами

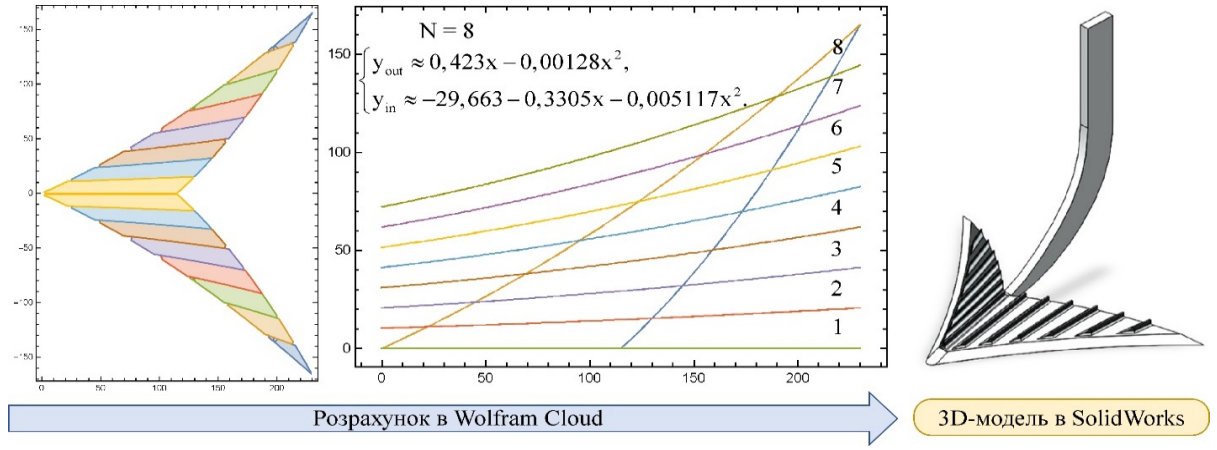


Рисунок 10 – Візуалізація увігнутої стрілчастої лапи із направляючими променями
Джерело: розроблено авторами

Для перевірки і визначення найбільш ефективної конструкції культиваторної лапи необхідно провести додаткове чисельне моделювання в CAE-системі (наприклад, Simcenter Star-CCM+) [26] і лабораторно-експериментальні дослідження в ґрунтовому каналі.

Висновки. У результаті аналізу морфології і локомоції риб та обробки їх фотозображення з використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV та методів зворотного інжинірингу (Reverse Engineering) проведено апроксимацію зовнішнього і внутрішнього контурів хвостового плавника деяких риб.

У результаті аналітичних досліджень проведено геометричний розрахунок рівнянь регресії опуклого і увігнутого зовнішнього контуру біонічних культиваторних лап на основі морфології хвостового плавника риби та побудовані їх тривимірні моделі в SolidWorks.

Аналіз морфології хвостових плавників дозволив застосувати до культиваторних лап промені (радіалії). Вони розташовані вздовж осьової лінії хвостового плавника із зміщенням на зовнішній контур. Встановлено загальну закономірність їх розташування, яку можна представити у вигляді системи рівняннь. Побудовані відповідні моделі культиваторних лап із направляючими променями в програмних пакетах Wolfram Cloud і SolidWorks.

З техніко-економічної точки зору забезпечення розробленої форми біонічних культиваторних лап дозволяє зменшити тяговий опір знаряддя на 5–10 %, що дозволить отримати більш високий економічний ефект від їх впровадження.

Список літератури

1. Тищенко С.С., Карась В.В. Машини для основного обробітку ґрунту: теорія та проектування поверхонь ґрунтообробних робочих органів: навч. посіб. Дніпро: Домінанта-Прінт, 2017 204 с.
2. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
3. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. К.: Нора-Прінт, 1999. 280 с.
4. Тищенко С.С., Карась В.В. Геометричні основи проектування поличних робочих органів: монографія. Дніпро: ТОВ «Домінанта-Прінт», 2019. 356 с.
5. Кобець А.С., Волик Б.А., Пугач А.М. Ґрунтообробні машини: теорія, конструкція, розрахунок: монографія. Дніпропетровськ: Свідлер А. Л., 2011. 140 с.
6. Тищенко С.С., Дубровін В.О., Теслюк В.В., Волянський М.С. Сільськогосподарські машини. Теорія і розрахунок робочих органів машин для поверхневого обробітку ґрунту: навч. посіб. К.: Компанія «Аграр Медіа Груп», 2014. 162 с.
7. Бабицький Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин. К.: Урожай, 1998. 164 с.
8. Алієв Е.Б., Лабатюк Ю.М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві:* Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 180. С.67–71.
9. Ren L. Q., Tong J., Li J. Q., Chen B. C. (2001). SW-Soil and Water: Soil adhesion and biomimetics of soil engaging components: a review. *Journal Agricultrual Engineering Research*, 79(3): 239–263. https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722
10. Tong J., Sun J. Y., Chen D. H., Zhang S. J. (2005). Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in til lage implements. *Soil and Tillage Research*, 80 (1): 1–12. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012.
11. Dai Z. D., Tong J., Ren L. Q. (2006). Researches and developments of biomimetics in tribology. *Chinese Science Bulletin*, 51(22): 2681–2689. https://doi.org/10.1007/s11434-006-2184-z

12. Sagnes P., Statzner B. (2009). Hydrodynamic abilities of riverine fish: a functional link between morphology and velocity use. *Aquatic Living Resources*, 22: 79-91. https://doi.org/10.1051/ALR/2009008
13. Sagong W., Jeon W. P., Choi H. Hydrodynamic Characteristics of the Sailfish (Istiophorus platypterus) and Swordfish (Xiphias gladius) in Gliding Postures at Their Cruise Speeds. PLOS ONE. 2013. 8 (12): e81323. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081323
14. Lauder G. V., Drucker E. GMorphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* . 2004. 29 (3): 556–571. https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833219
15. Song J., Zhong Y., Du R., Yin L., Ding Y. Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish. J *Mechanical Engineering Science*. 2021. 235 (2): 351–364. https://doi.org/10.1177/0954406220967687
16. Lucas K. N., Lauder G. V., Tytell E. D. The fish body functions as an airfoil: surface pressures generate thrust during carangiform locomotion. *BioRxiv*. (2020. 958389. https://doi.org/10.1101/ 2020.02.20.958389
17. Salazar R., Campos A., Fuentes V., Abdelkefi A. A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned vehicles. *Ocean Engineering*. 2019. 172: 257–285. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.047
18. Xue G., Bai F., Guo L., Ren P., Liu Y. Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom. *Front. Mar. Sci.* 2023. 10: 1091523. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1091523
19. Fletcher T., Altringham J., Peakall J., Wignall P., Dorrel R. Hydrodynamics of fossil fishes. Proc. R. Soc. B. 2014. 281: 20140703. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0703
20. Fish morphology. The Education Program at the New Jersey Sea Grant Consortium. 22 Magruder Road Fort Hancock, 2014. NJ 07732 732-872-1300.
21. Keat-Chuan Ng C., Aun-Chuan Ooi P., Wong W. L., Khoo G. A Review of Fish Taxonomy Conventions and Species Identification Techniques. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*. 2017. 4 (1): 54–93.
22. Кушнарев А. С., Кочев В И. Механико-технологические основы обработки. К.: Урожай, 1989. 144 с.
23. Лабатюк Ю. М., Алієв Е. Б. Математичне моделювання процесу взаємодії робочого органу глибокорозпушувача з ґрунтом. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип.5 (2). С.133–140.
24. Timoshenko S. P., Goodier J. N. Theory of Elasticity. McGraw-Hill, Third Ed., New York, 1970. 522 p.
25. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: монографія. Київ, 2016. 145 с.
26. Aliiev, E., Tesliuk, H., Puhach, A., Kobets, O., Zolotovska, O., Boiko, V. Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 4 (1 (124)), 60–71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284597.

Referencis

1. Tyshchenko, S. S. & Karas, V. V. (2017). *Mashyny dlia osnovnoho obrobitku gruntu: teoriia ta proektuvannia poverkhon gruntoobrobnykh robochykh orhaniv: navch. posib [Machines for basic tillage: theory and design of surfaces of tillage working bodies: training. manual]*. Dnipro: Dominanta-Print ISBN 978-617-646-234-8 [in Ukrainian].
2. Shevchenko, I. A. (2016). *Keruvannia ahrofizychnym stanom gruntovoho seredovyshcha [Management of the agrophysical state of the soil environment]*. Kyiv: Vydavnychyi dim «Vinichenko» ISBN 978-966-2622-22-5 [in Ukrainian].
3. Hukov, Ya. S. (1999). *Obrobitok gruntu. Tekhnolohiia i tekhnika. Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia enerhozberihaiuchykh zasobiv dlia mekhanizatsii obrobitku gruntu v umovakh Ukrainy [Tillage. Technology and equipment. Mechanical and technological substantiation of energy-saving means for the mechanization of soil cultivation in the conditions of Ukraine]*. Kyiv: Nora-Print [in Ukrainian].
4. Tyshchenko, S. S. & Karas, V. V. (2019*). Heometrychni osnovy proektuvannia polychnykh robochykh orhaniv: monohrafiia [Geometric bases of design of shelf working bodies: monograph]*. Dnipro: TOV «Dominanta-Print». ISBN 978-617-7371-46-4 [in Ukrainian].
5. Kobets, A. S., Volyk, B. A. & Puhach, A. M. (2011). *Gruntoobrobni mashyny: teoriia, konstruktsiia, rozrakhunok: monohrafiia [Soil tillage machines: theory, design, calculation: monograph]*. Dnipropetrovsk: Svidler A. L. [in Ukrainian].

6. Tyshchenko, S. S., Dubrovin, V. O., Tesliuk, V. V. & Volianskyi, M. S. (2014). *Silskohospodarski mashyny. Teoriia i rozrakhunok robochykh orhaniv mashyn dlia poverkhnevoho obrobitku gruntu: navch. posib. [Agricultural machinery. Theory and calculation of working bodies of machines for surface tillage: training. manual]*. K.: Kompaniia «Ahrar Media Hrup» . ISBN 978-617-646-234-7 [in Ukrainian].
7. Babytskyi, L. F. (1998). *Bionichni napriamy rozrobky gruntoobrobnykh mashyn [Bionic directions of development of tillage machines]*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
8. Aliiev, E. B. & Labatiuk, Yu. M. (2017). *Chyselne modeliuvannia mekhaniko-tekhnolohichnykh protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva [Numerical modeling of mechanical and technological processes of agro-industrial production]*. Suchasni problemy vdoskonalennia tekhnichnykh system i tekhnolohii u tvarynnytstvi: Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka, *180*: 67–71 [in Ukrainian].
9. Ren, L. Q., Tong, J., Li, J. Q. & Chen, B. C. (2001). *SW-Soil and Water: Soil adhesion and biomimetics of soil engaging components: a review*. Journal Agricultrual Engineering Research, *79(3):* 239–263. https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0722 [in English].
10. Tong, J., Sun, J. Y., Chen, D. H.b& Zhang, S. J. (2005). *Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in til lage implements*. Soil and Tillage Research, *80 (1):* 1–12. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.012 [in English].
11. Dai, Z. D., Tong, J. & Ren, L. Q. (2006). *Researches and developments of biomimetics in tribology.* Chinese Science Bulletin, *51(22):* 2681–2689. https://doi.org/10.1007/s11434-006-2184-z [in English].
12. Sagnes, P. & Statzner, B. (2009). *Hydrodynamic abilities of riverine fish: a functional link between morphology and velocity use.* Aquatic Living Resources, *22*: 79-91. https://doi.org/10.1051/ALR/2009008 [in English].
13. Sagong, W., Jeon, W. P. & Choi, H. (2013). *Hydrodynamic Characteristics of the Sailfish (Istiophorus platypterus) and Swordfish (Xiphias gladius) in Gliding Postures at Their Cruise Speeds*. PLOS ONE *8 (12):* e81323. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081323 [in English].
14. Lauder, G. V. & Drucker, E. G. (2004). *Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, *29 (3):* 556–571. https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833219 [in English].
15. Song, J., Zhong, Y., Du, R., Yin, L. & Ding, Y. (2021). *Tail shapes lead to different propulsive mechanisms in the body/caudal fin undulation of fish.* J Mechanical Engineering Science, *235 (2):* 351–364. https://doi.org/10.1177/0954406220967687 [in English].
16. Lucas, K. N., Lauder, G. V. & Tytell, E. D. (2020). *The fish body functions as an airfoil: surface pressures generate thrust during carangiform locomotion.* BioRxiv, 958389. https://doi.org/10.1101/2020.02.20.958389 [in English].
17. Salazar, R., Campos, A., Fuentes, V. & Abdelkefi, A. (2019). *A review on the modeling, materials, and actuators of aquatic unmanned vehicles*. Ocean Engineering, *172*: 257–285. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.047 [in English].
18. Xue, G., Bai, F., Guo, L., Ren, P. & Liu, Y. (2023). *Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom.* Front. Mar. Sci. *10:* 1091523. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1091523 [in English].
19. Fletcher, T., Altringham, J., Peakall, J., Wignall, P. & Dorrel, R. (2014). *Hydrodynamics of fossil fishes.* Proc. R. Soc. B. *281:* 20140703. https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0703 [in English].
20. Fish morphology. (2014). *The Education Program at the New Jersey Sea Grant Consortium*. 22 Magruder Road Fort Hancock, NJ 07732 732-872-1300 [in English].
21. Keat-Chuan, Ng C., Aun-Chuan, Ooi P., Wong, W. L. & Khoo, G. (2017). *A Review of Fish Taxonomy Conventions and Species Identification Techniques.* Journal of Survey in Fisheries Sciences, *4 (1):* 54–93.
22. Kushnarev, A. S. & Kochev, V. I. (1989). Mehaniko-tehnologicheskie osnovyi obrabotki pochvyi [Mechanical and technological foundations of soil cultivation]. Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].
23. Labatiuk, Yu. M. & Aliiev, E. B. (2015). *Matematychne modeliuvannia protsesu vzaiemodii robochoho orhanu hlybokorozpushuvacha z gruntom [Mathematical modeling of the process of interaction between the working body of the soil-corrosion agent and the soil]*. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu, *5 (2):* 133–140 [in Ukrainian].
24. Timoshenko, S. P. & Goodier, J. N. (1970). Theory of Elasticity. McGraw-Hill, Third Ed., New York [in English]

25. Hutsol, O. P. & Kovbasa, V. P. (2016). *Obgruntuvannia parametriv i rezhymiv rukhu gruntoobrobnykh mashyn z dyskovymy robochymy orhanamy [Setting parameters and operating modes of soil-processing machines with disk working bodies]*. Kyiv [in Ukrainian].
26. Aliiev, E., Tesliuk, H., Puhach, A., Kobets, O., Zolotovska, O., Boiko, V. (2023). Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (124)), 60–71. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284597.

Hennadii Tesliuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Elchyn Aliiev, Senior Researcher, Prof., DSc.
Yuliia Tesliuk, PhD
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Technical and Economic Justification of Geometric Parameters of Bionic Cultivation Tines Based on Fish Morphology

Therefore, the challenge of aligning the morphology of terrestrial and aquatic fauna with the surface of soil cultivation implements is relevant and requires attention.

The research objective is to perform geometric calculations for bionic cultivation tines based on fish morphology and create their three-dimensional models. The analysis of fish morphology and locomotion, along with image processing using developed software in the Visual Studio C++ environment, OpenCV library, and reverse engineering methods, facilitated the approximation of the outer and inner contours of the tail fin of certain fish species.

Through analytical investigations, the geometric calculations for the regression equations of convex and concave outer contours of bionic cultivation tines based on the morphology of fish tail fins were conducted, and their three-dimensional models were built using SolidWorks. The analysis of tail fin morphology allowed for the application of rays (radials) to cultivation tines. These rays are aligned along the axial line of the tail fin with displacement toward the outer contour. A general regularity in their arrangement was established and represented as a system of equations. Corresponding models of cultivation tines with guiding rays were constructed using software packages such as Wolfram Cloud and SolidWorks.

From a technical and economic perspective, the implementation of the developed bionic cultivation tine shapes can reduce the equipment's drag resistance by 5–10%, leading to a higher economic benefit upon their adoption.

cultivator paw, soil, bionics, morphology, fish, tail fin, reverse engineering, design, analysis, technique

Одержано (Received) 29.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 636.4:636.083 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.66-84

Г. М. Калетнік, проф., д-р екон. наук, **В. М. Яропуд,** доц., канд. техн. наук
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
e-mail: yaropud77@gmail.com

Експериментальні дослідження ефективності функціонування систем забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях

Обґрунтування раціональної схеми системи забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях на основі виробничих обстежень є основною метою проведених досліджень. За результатами досліджень встановлено, що для тваринницького приміщення із системою вентиляції наземного каналу забезпечується більше свіжого повітря в зоні перебування тварин, у порівняні зі стельовою системою вентиляції і системою вентиляції через стінові канали.
повітря, температура, вологість, швидкість, забруднення, вентиляція, чисельне моделювання

Постановка проблеми. Якість повітря та якість мікроклімату у тваринницькому приміщені можна охарактеризувати концентрацією забруднень (наприклад, аміаку, пилу та бактерій), а також температурою, вологістю та швидкістю повітря в зоні перебування тварин, оскільки високі концентрації забруднюючих речовин та високі температури негативно впливають на здоров'я тварин і продуктивність. Занадто низькі температури повітря або високі швидкості повітря в зоні перебування тварин також суттєво впливають на здоров'я тварин, їх поведінку та продуктивність, особливо для відлучених поросят.

Повітря у тваринницькому приміщені містить забруднювачі, вологу та тепло, що виділяються тваринами, кормом, поверхнею підлоги та гною. Через вентиляцію видаляється забруднене повітря, волога і тепло. Система вентиляції забезпечує розподіл свіжого повітря в будівлі. Потрібно добре розуміти ефективність, з якою різні вентиляційні системи видаляють забруднення та тепло. Підвищення ефективності вентиляції є важливою стратегією для зниження концентрації забруднюючих речовин у приміщеннях для тварин [1].

Дослідження, які представлені, базуються на результатах практичних вимірювань в ході експериментальних досліджень і чисельного моделювання. Отримані уявлення про схеми повітряного потоку в зоні перебування тварин для трьох систем вентиляції, які зазвичай використовуються в приміщеннях для утримання свиней, нададуть змогу визначити їх ефективність і позбавити їх від недоліків. Вимірювання якості повітря (вмісту CO_2, температури, швидкості і вологості повітря) в зоні перебування тварин кожної системи вентиляції проводили для поросят на дорощуванні у виробничих умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.Сільське господарство України є провідною галуззю національної економіки. В умовах фінансово-економічної кризи перед вітчизняними сільськогосподарськими підприємствами постає важливе стратегічне завдання: з одного боку, забезпечити прибуткову діяльність, а з іншого, в майбутньому шукати шляхи розвитку, основою якого є ефективне використання с.-г відходів для енергетичної автономії сільськогосподарських підприємств [2].

© Г.М. Калетнік, В.М. Яропуд, 2023

Ефективна система управління сільськогосподарськими підприємствами базується на численних принципах, серед яких ключовими є системність, комплексність, відкритість, прозорість, гнучкість, висока адаптивність, оптимальне поєднання інтересів підприємства та інтересів регіонального та економічного розвитку як ціле та інші принципи. Наразі найбільш ефективне управління підприємствами сприяє розвитку аграрного ринку України в цілому [3].

Швидке зростання світового споживання енергії у тваринницьких комплексах викликало серйозну стурбованість з приводу виснаження енергетичних ресурсів. Зростання споживання енергії тваринницькими комплексами спричинено такими факторами, як зростання чисельності поголів'я тварин та підвищення вимог до забезпечення мікроклімату в приміщеннях [4].

За останні десятиліття споживання первинної енергії в тваринництві зросло на 29%. На підтримання мікроклімату у тваринницьких приміщеннях припадає велика частина загального кінцевого споживання енергії. Можна помітити, що енергія, яка використовується для охолодження, є важливою частиною загального споживання енергії, що постійно збільшується через зростаючий попит на кращий комфорт у тваринницьких приміщеннях. Енергетична політика багатьох країн світу зосереджена на скороченні споживання електричної енергії та впровадженні нових технологій, які вважаються екологічно чистими [5]. Через зростаючу потребу в кондиціюванні та зростаючий інтерес до енергозбереження, пошук шляхів зменшення споживання твердого палива та збільшення використання відновлюваної енергії під час процесу кондиціювання у тваринницькому секторі агропромислового виробництва є надзвичайно важливим.

Тваринницький сектор агропромислового виробництва має найбільший потенціал для підвищення ефективності використання енергії. Видно, що енергія, яка використовується для охолодження повітря, є важливою частиною загального споживання енергії, яка постійно зростає у зв'язку з підвищеними вимогами до забезпечення оптимального мікроклімату у тваринницьких приміщеннях [6, 7, 8]. Найбільша частка енергозатрат тваринницьких приміщень припадає на створення нормативних параметрів мікроклімату, зокрема на підігрів припливного вентиляційного повітря. В опалювальний період теплогенеруючі пристрої цих приміщень споживають за різними оцінками від 40 до 90 % від сукупних затрат паливно-енергетичних ресурсів [9]. Тому навіть часткове зниження цих затрат приведе до суттєвого скорочення затрат на виробництво продукції тваринництва.

Ефективним способом скорочення витрат енергії тваринницьких приміщень є використання теплоти вентиляційних викидів для підігріву припливного вентиляційного повітря [10]. Складність використання теплоти повітря вентиляційних викидів полягає в тому, що викидне повітря є низькопотенційним джерелом теплової енергії [11].

Найбільш перспективними способами використання теплоти вентиляційних викидів є застосування теплообмінників (теплоутилізаторів). Теплообмінники (теплоутилізатори) вентиляційних викидів завдяки своїй ефективності знаходять все більше розповсюдження як в житлових та адміністративних приміщеннях, так і в спорудах промислового призначення. Застосування теплообмінника (теплоутилізатора) вентиляційних викидів в системі забезпечення мікроклімату тваринницьких приміщень дозволяє скоротити затрати енергії на підігрів припливного повітря до 80 % [12].

За останні два десятиліття для цілей обігріву в приміщеннях АПК було впроваджено багато нових пристроїв на основі відновлюваної енергії: нові установки рекуперації теплоти, теплові насоси, сонячні системи та багато інших [13]. Однак серед

них жодного пристрою на основі поновлюваних джерел енергії, які до цього часу не були широко застосовані в області охолодження.

Для забезпечення відведення повітря з приміщення свинарника створена автоматична вентиляційна система забору забрудненого повітря з тваринницьких приміщень [9, 14]. В результаті аналітичних досліджень даної системи математично представлено умову її ефективної роботи. Розроблена методика і реалізований на основі неї алгоритм дозволяє розраховувати площі отворів, які утворюють забірні заслінки із сервоприводами у патрубках для забору повітря. Отримані залежності зміни втрат тиску і потужності, яка необхідна для прокачування повітря через теплообмінник побічно-випарного типу циклу Майсоценка, від ширини центрального повітропроводу, витрат повітря через систему, довжини між патрубками системи і їх кількості [15]. До факторів, які викликають труднощі утилізації теплоти вентиляційних викидів тваринницьких приміщень відносяться [9]:

- значна запиленість повітря (до 6 мг/м^3);
- висока вологість повітря в приміщенні, яка при дотриманні нормативних параметрів повітряного середовища досягає 80 %;
- наявність в повітрі високої концентрації агресивних газів: аміаку – до 20 мг/м^3, сірководню – до 10 мг/м^3, вуглекислого газу – до 0,28 %;
- неприйнятність для більшості тваринницьких приміщень навіть часткової рециркуляції витяжного повітря;
- значна кількість технологічного обладнання, що є характерним для сучасних тваринницьких приміщень та зумовлена цим схема організації повітрообміну.

Постановка завдання. Метою досліджень є обґрунтування раціональної схеми системи забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях на основі виробничих обстежень.

Виклад основного матеріалу. Ефективність видалення забруднень із зони перебування тварин представляється ефективністю видалення забруднень (ξ) [12]. Значення ξвизначається локальними вимірюваннями концентрацій (газоподібних) забруднюючих речовин, що викидаються у приміщенні для утримання свиней. Значення ξу довільній точці ру момент tдля будь-якого забруднення визначається як:

$$\xi_{x,p,t} = \frac{C_{x,e,t} - C_{x,i,t}}{C_{x,p,t} - C_{x,i,t}} \quad (1)$$

де $\xi_{x,p,t}$– ефективність видалення забруднень в точці p у момент часу t для забруднення x;

$C_{x,e,t}$ – концентрація забруднювача x у витяжному повітрі в момент часу t, мг/м^3;

$C_{x,p,t}$ – концентрація забруднювача x у точці p в момент часу t, мг/м^3;

$C_{x,i,t}$ – концентрація забруднювача x у притяжному повітрі в момент t, мг/м^3.

Ефективність відведення теплоти від зони перебування тварин аналогічно може бути виражена через ефективність відведення теплоти (ζ). Рівняння (1) також можна використовувати для розрахунку ζ шляхом заміни локальних концентрацій на локальні значення температури.

Ефективність видалення забруднень і теплоти будуть дорівнювати одиниці в ідеально змішаному повітряному просторі. У приміщенні з ідеальним ламінарним потоком від входу до виходу та однорідно розподіленими джерелами забруднень і теплоти значення ефективності видалення забруднень і теплоти зменшуються від нескінченної кількості на вході до одиниці на виході.

Однак на практиці жодна вентиляційна система не є ідеальним ламінарним

потоком або ідеальним змішуванням. Усі вентильовані повітряні простори демонструють градієнти температури, вологості, забруднювачів і пилу через схеми повітряного потоку та різні місця розташування джерел забруднювачів, що призводить до значень ефективності видалення забруднень і теплоти вище або нижче одиниці. Значення ξ вище одиниці вказують, що свіже повітря спочатку потрапляє в зону перебування тварин, а потім проходить через джерела забруднювачів на шляху до виходу, що має вказувати на ефективне витіснення повітря в зону перебування тварин. Значення ξ нижче одиниці вказують на те, що концентрація забруднювача в зоні перебування тварин перевищує концентрацію забруднювача у витяжному повітрі. Ці нижчі значення можуть мати місце, коли частина свіжого повітря видаляється з приміщення, не викликаючи зміщення повітря в зоні перебування тварин, або коли довільна точка рзнаходиться поблизу джерела забруднення. Низькі значення ξ вказують на високий рівень забруднюючих речовин, які неефективно видаляються із зони перебування тварин.

Дослідження зосереджені на визначені ефективності видалення забруднень і теплоти в зоні перебування тварин. Ефективне видалення забруднювачів із зони перебування тварин (ξ> 1) є бажаним за низьких показників вентиляції, що сприяє відповідній якості повітря в зоні перебування тварин та економії енергії для опалення, оскільки потрібно менше вентиляційного повітря. Ефективне відведення теплоти від зони перебування тварин (ζ> 1) є бажаним за високої швидкості вентиляції, коли вентиляція в основному призначена для контролю температури в зони перебування тварин.

У трьох приміщеннях, де знаходяться свині на дорощуванні, проведено вимірювання вмісту CO_2 і температури повітря, для визначення значень ξ і ζ. Експериментальні дослідження проводилися у виробничих умовах на свинофермах ФГ «Літагор» (Україна, Вінницька область, Козятинський район, с. Миколаївка), ТОВ «Субекон» (Україна, Вінницька область, Тиврівський район, смт Сутиски), ПСП «Агрофірма Нападівська» (Україна, Вінницька область, Вінницький район, с. Нападівка).

Свинарники побудовані за класичними проєктами і мали подібні теплоізоляційні властивості. Внутрішня висота стін приміщень становила 2,20–2,40 м, найвища точка стелі знаходилась на висоті 4,00–4,20 м. План і поперечний переріз трьох приміщень показані на рис. 1–3. На рис. 1–3 також відмічені точки відбору проб. Приміщення узагальнюють три найбільш поширених системи вентиляції.

Варіант 1 (ФГ «Літагор») – система вентиляції наземного каналу (рис. 1). В приміщенні розміщені 12 груп по 25 поросят на дорощуванні. Площа підлоги становила 0,30±0,01 $м^2$/голову, з яких 56,6±0,1 %є решітчастою, а 43,4±0,1 %– суцільна. Загони були 3,30±0,01 м × 3,65±0,01 м. Опалення забезпечувалося трубами з гарячою водою вздовж стіни в проході для операторів і на суцільній підлозі в станках. Вентиляційне повітря попередньо нагрівалося до 5±0,1 °С у центральному проході, звідки воно надходило в наземний канал через отвір у підлозі. Повітря поступало під тверду підлогу загонів і до проходу для оператора, минаючи простір під лотками для гною, які розташовані під пластиковими планками. Повітря надходило в приміщення через щілину (0,060±0,005 м завширшки) по довжині (7,30±0,01 м) підлоги проходу оператора. Середня швидкість повітря в щілині коливалася від 0,12 м/с до 1,13 м/с, а подача повітряу вентиляційній системі – від 3,5 до 26 $м^3$/год на тварину.

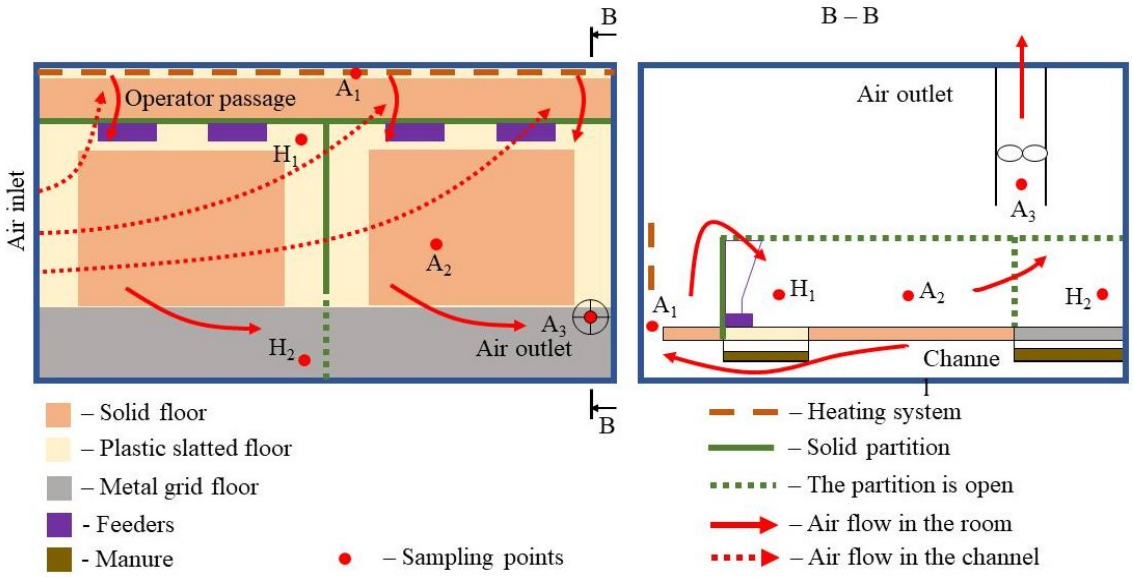


Рисунок 1 – Схема системи вентиляції наземного каналу (варіант 1)

Джерело: розроблено авторами

У конструкції передбачалося, що свіже повітря буде проходити з низькою швидкістю через вхідний отвір і заповнювати прохід оператора. Очікувалося, що звідти повітря буде перетікати через передню частину загону і через перегородку загону (висота 0,60±0,01 м) – до тварин. Очікувалося, що в загоні повітря буде надходити до задньої частини загону, надаючи свіже повітря в зону перебування тварин і видаляючи забруднення з неї. В основі процесу вентиляції лежить витіснення та перемішування повітря. Вентиляція приводилася в дію вентилятором (діаметр 0,35±0,02 м), який розташований у задній частині приміщення на висоті 1,00±0,01 м, на відстані 0,05±0,01 м від задньої стіни та 0,70±0,01 м від бічної стіни.

Варіант 2 (ПСП «Агрофірма Нападівська») – стельова система вентиляції (рис. 2). В приміщенні розміщені 16 груп по 20 поросят на дорощуванні. Площа підлоги становила 0,90±0,01 м^2/голову, з яких 50,0±0,1 % була решітчаста, а 50,0±0,1 % – суцільна. Загони були 5,70±0,01 м × 3,00±0,01 м. Опалення забезпечувалося теплообмінниками з гарячою водою біля зовнішньої стіни у приміщеннях. Вентиляційне повітря проходить крізь 32 стельових припливних канали (0,30±0,01 м × 0,50±0,01 м), а потім до двох витяжних шахтах (Ø 0,65±0,01 м), які розміщені в центрі приміщення в стелі. Витрати повітря у витяжних шахтах коливаються від 3,5±0,1 до 25±0,1 м^3/год на тварину. В якості охолодження в літній період використовуються форсунки зрошення, які розміщені у стінових припливних каналах, що забезпечують дрібнодисперсну подачу води продуктивністю 14–18 кг/год.

Варіант 3 (ТОВ «Субекон») – система вентиляції через стінові канали (рис. 3).В приміщенні розміщені 8 груп по 25 поросят на дорощуванні (200 голів). Площа підлоги становила 1,08±0,01 м^2/голову, з яких 94,3±0,1 % була решітчаста, а 5,7±0,1 % – суцільна. Загони мали розміри 4,5±0,01 м × 5,5±0,01 м. Опалення забезпечувалося теплообмінниками з гарячою водою біля зовнішньої стіни у приміщеннях. Вентиляційне повітря проходить крізь 12 стінових припливних каналах (0,35±0,01 м × 1,00±0,01 м), а потім до трьох витяжних шахт (Ø 0,65±0,01 м), які розміщені в центрі приміщення у стелі. Витрати повітря у витяжних шахтах коливаються від 3,5±0,1 до 25±0,1 м^3/год на тварину. В якості охолодження в літній період використовуються форсунки зрошення, які розміщені у стінових припливних каналах, що забезпечують дрібнодисперсну подачу води продуктивністю 14–18 кг/год.

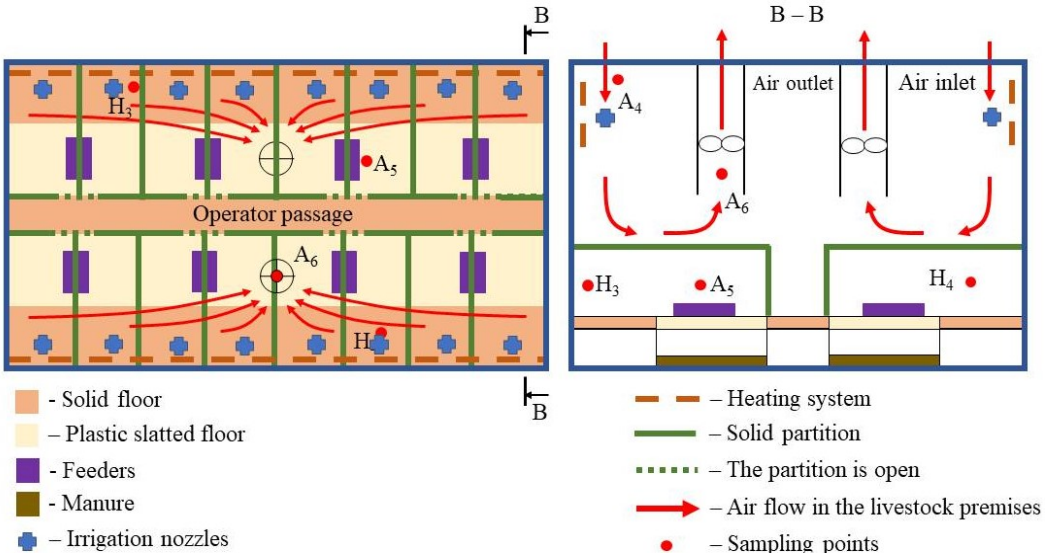


Рисунок 2 – Схема стельової системи вентиляції (варіант 2)

Джерело: розроблено авторами

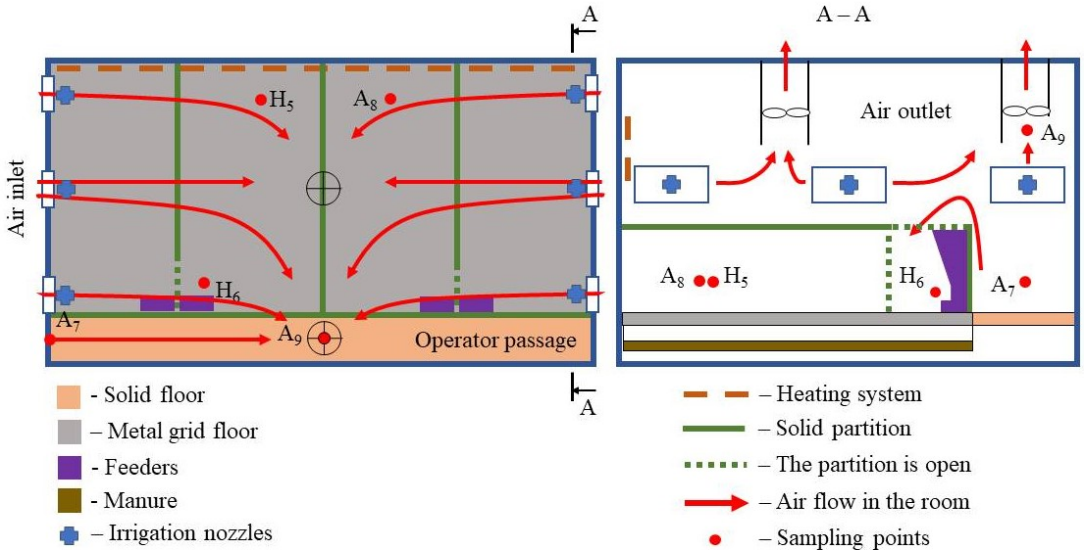


Рисунок 3 – Схема приміщенні із системою вентиляції через стінові канали (варіант 3)

Джерело: розроблено авторами

Фото з виробничих умов проведення досліджень трьох варіантів систем вентиляції свинарських приміщень представлено на рис. 4.

Контроль інтенсивності вентиляції та опалення у всіх трьох приміщень базувався на виміряній внутрішній температурі та налаштуваннях клімат-контролера взимку і влітку. Поросят відлучають з 20–21 денного віку і переводять у групові станки для дорощування до 77–78 денного віку, а саме до переведення в групу відгодівельного або ремонтного молодняку (при досягненні маси 38 кг). Тому загальний термін перебування поросят на дорощуванні складає в середньому 56–57 днів.

У перший день після відлучення поросят поміщали в приміщення, температура в якому складала 23–25 °С. Для зимового періоду (починаючи з лютого) повітря в приміщенні підігрівали за допомогою системи опалення, в літній період – охолоджували за допомогою системи зрошення повітря.

У кожному приміщенні розташовано п’ять точок відбору проб, три з яких – в зоні перебування тварин (рис. 1–3).

Міркування щодо визначення розташування цих точок відбору проб в зоні перебування тварин були такими: наявність точки відбору проб може не впливати на поведінку тварин у груповому станку; очікуються відмінності в концентрації CO_2 аботемператури в межах зони перебування тварин, тому точки відбору проб повинні бути розподілені таким чином, щоб це можна було виміряти. Принаймні одна з точок відбору проб має бути розташована в зоні очікуваного знаходження (відпочинку) тварин; розташування точок відбору проб має бути практичним для власника господарства.

Три точки відбору проб в приміщенні були підключені до системи ТМ-32/Н-5Т (Укрреле, Україна) та ArduinoNano (ArduinoSoftware) для вимірювання концентрації CO_2 і температури, використовуючи відповідно датчик вмісту вуглецевого газу SEN0159 (SEN0159, КНР), точність – ± 5 % і датчик температури DS18B20 (DallasSemiconductor, США), точність – ± 0,1 °С. Дані записувалися послідовно кожну годину на персональний комп'ютер з використанням програмного забезпечення компанії Укрреле (Україна). Ці точки відбору проб були розташовані у зоні входу повітря, у зоні випуску повітря та в зоні перебування тварин приблизно на 0,20 ± 0,03 м над підлогою та позначені літерою «А» на рис. 1–3.



Система вентиляції наземного каналу



Стельова система вентиляції



Система вентиляції через стінові канали

Рисунок 4 – Загальний вигляд свинарських приміщень із різними системами вентиляції

Джерело: розроблено авторами

Ще дві точки відбору проб в зоні перебування тварин були підключені до ручної вимірювальної системи мультигазовий детектор WALCOM MGD-04 (КНР), точність ± 5 %, для вимірювання концентрації CO_2, яка реєструвалася один раз на день впродовж першого тижня партії та тричі на тиждень пізніше (по черзі вранці та вдень). Ці точки відбору проб були розташовані приблизно на 0,20±0,03 м над підлогою та позначені літерою «Н» на рис. 1–3. Окрім цього, один раз при найвищих і найнижчих температурах навколишнього середовища проводились фотографування приміщень свинарника тепловізором FLIR T200 (Teledyne FLIR, США) для визначення градієнту розподілу температури.

З автоматичних і ручних точок відбору проб відбирали зразки повітря та транспортували через систему тефлонових труб до датчика CO_2 за межами приміщень таким чином, щоб поведінка тварин і характеристики повітряного потоку на ці показники не впливали. Термопари та система тефлонових труб були захищені від тварин перфорованими залізними трубами. У вентиляційній витяжній шахті безперервно вимірювали інтенсивність вентиляції з використанням анемометра Benetech GM8903 (КНР). Лежачу поведінку тварин реєстрували один раз на тиждень за середньою кількістю поросят, які лежали в межах кола діаметром 1 м навколо кожної точки відбору проб.

Порода поросят – трипорідний гібрид генетики PIC (F1 × PIC 337). Всі дані були зібрані за період грудень–березень і червень–серпень 2022-2023 рр. Щодня світло в приміщеннях було ввімкненим з 7:00 до 16:00.

Зміна клімату стала загрозливою проблемою для всіх країн світу. Тенденція зміни клімату безпосередньо впливає на економічний розвиток будь-якої країни.Україна є аграрною країною, і кліматичні умови безпосередньо впливають на її економічну стабільність. Територія України перебуває в помірному кліматичному поясі в області помірно континентального клімату [16], який характеризується жарким літом і холодною зимою. Аналіз зміни температури повітря і вологості в навколишньому середовищі Вінницької області (рис. 5) дає змогу визначити тривалість літнього і зимового періодів 2022 р. [17].

З рис. 5 та більш розширених даних [17] видно, що температура і вологість досить суттєво коливаються впродовж доби.

Враховуючи необхідність постійного повітрообміну між тваринницьким приміщенням і навколишнім середовищем, вимогами до показників мікроклімату для різних статевовікових груп очевидно виникає необхідність в зимовий період підвищувати температуру повітря з навколишнього середовища, яка потрапляє до приміщення, а в літній навпаки – знижувати її.

Окрім цього, в зв’язку із високим значенням вологості повітря (від 80 до 100 %) в навколишньому середовищі в зимовий період необхідно його осушувати під час руху його до приміщення. А в літній період при високих температурах повітря (більше 30 °С), навпаки, зволожувати припливне повітря.

У таблиці 1 наведено середні значення зовнішніх і вхідних умов під час експерименту. У приміщенні зі стельовою вентиляцією вхідне повітря зазвичай мало нижчу температуру та концентрацію CO_2, оскільки вхідне повітря для цього приміщення витягувалося ззовні, а не з центрального проходу.

У таблиці 2 наведені результати продуктивності тварин під час дослідних партій. Незважаючи на деякі відмінності, виробничі результати в усіх трьох приміщеннях були достатніми, що вказує на те, що всі три системи вентиляції функціонували на задовільному рівні, однак з деякими недоліками. Результати продуктивності тварин не аналізувалися, оскільки експериментальні дані не були

придатні для визначення відмінностей у виробництві, спричинених системою вентиляції. Крім різниці в системах вентиляції, існували відмінності в розмірі групи, плануванні підлоги та системах годування. Щоб порівняти результати вирощування тварин, усі ці фактори повинні бути враховані, системи вентиляції повинні знаходиться в одній будівлі.

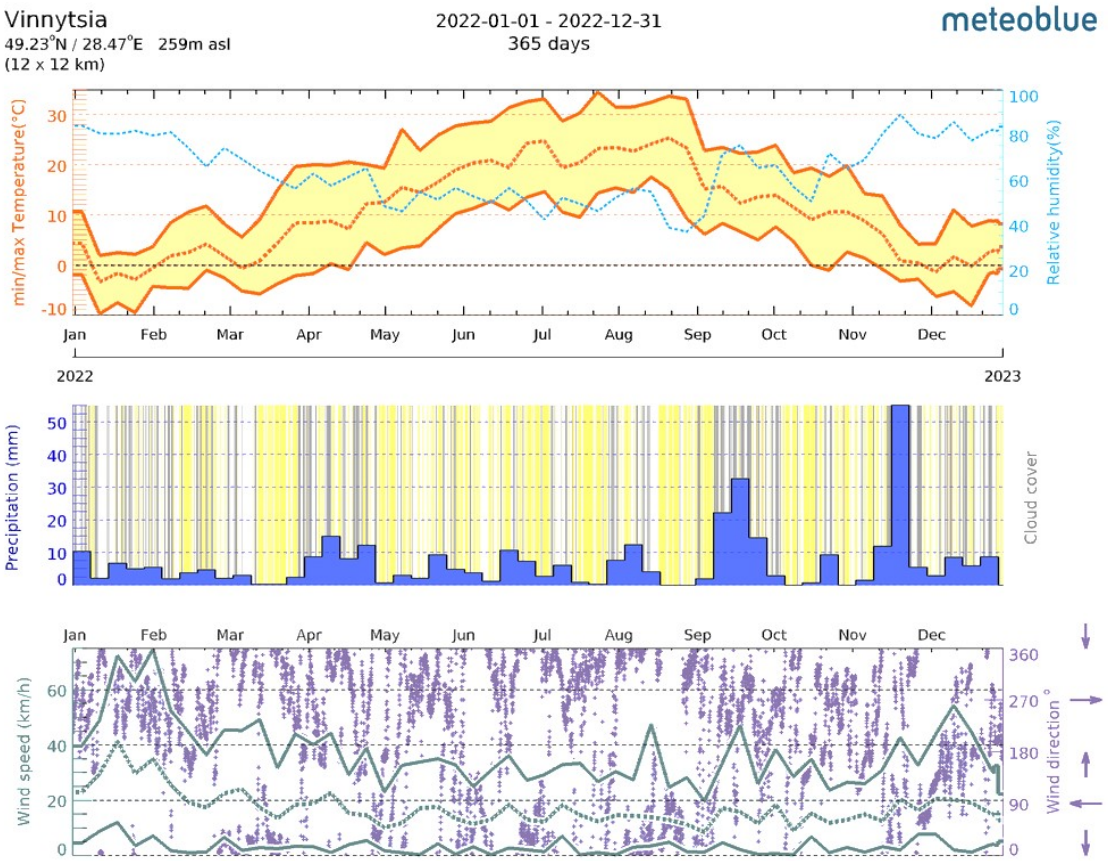


Рисунок 5 – Динаміка температури повітря, вологості та інших параметрів навколишнього середовища міста Вінниці (meteoblue.com, 2022)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Мінімальні, максимальні та середні значення зареєстрованих концентрацій CO_2 у повітрі та його температур

Варіант системи вентиляції	Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
Партія	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)
Дата початку	17.12	07.06	25.01	14.06	20.01	15.06
Дата закінчення	11.02	02.08	19.02	09.08	14.02	10.08
Кількість спостережень	881	1052	721	1072	721	989
CO_2 вхідне повітря (мг/м^3)						
Мінімум	698	633	662	628	684	623
Максимум	1243	1271	1042	1123	1222	1204
Середнє	805	747	744	735	773	736

Продовження таблиці 1

Зовнішня температура повітря (°C)						
Мінімум	– 10,5	13,6	– 10,3	12,6	– 11,4	13,5
Максимум	11,1	38,1	10,2	35,9	11,2	34,6
Середнє	2,8	23,7	3,8	21,6	3,2	24,3
Температура повітря на вході (°C)						
Мінімум	8,2	14,1	– 0,1	13,5	6,1	14,4
Максимум	15,1	34,6	13,7	35,2	15,1	32,7
Середнє	11,2	22,3	7,5	20,3	10,2	23,1

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Середня продуктивність тварин за двома партіями

Варіант системи вентиляції	Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
Партія	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)
Середня початкова маса поросяти (кг)	7,98 ±0,56	7,11 ±0,75	8,21 ±0,64	8,67 ±0,56	7,55 ±0,63	7,96 ±0,45
Середня кінцева вага поросяти (кг)	26,22 ±0,76	28,32 ±0,66	24,75 ±0,68	25,33 ±0,71	22,71 ±0,53	24,06 ±0,64
Середній приріст за день на порося (кг)	0,326 ±0,023	0,379 ±0,027	0,295 ±0,019	0,298 ±0,032	0,270 ±0,031	0,288 ±0,027
Середній коефіцієнт конверсії корму (кг/кг)	1,30 ±0,12	1,42 ±0,09	1,33 ±0,10	1,39 ±0,08	1,35 ±0,15	1,40 ±0,14

Джерело: розроблено авторами

Вміст CO_2 і температури, зібрані автоматичною системою, були перевірені на наявність відсутніх даних. У випадках, коли одне значення (вхід, зона перебування тварин або вихід) було відсутнє, так що ξ та ζ не можна було визначити, інші два вимірювання видалялися. Три автоматичні вимірювання (вхід, зона перебування тварин та вихід) були визначені як одне спостереження і використані для розрахунку ξ та ζ за допомогою рівняння (1) (кількість спостережень у таблиці 1). Концентрації CO_2 в зоні перебування тварин, зібрані ручною системою, були об'єднані з найближчими (за часом) концентраціями CO_2 на вході та виході, визначеними автоматичною системою. Це було визначено як одне спостереження та використано для розрахунку ξ та ζ за допомогою рівняння (1).

Середнє значення і стандартне відхилення ξ та ζ визначали для кожної точки відбору. У графічному аналізі значення ξ і ζ були нанесені на графік відносно швидкості повітря у вентиляції. Неможливо провести статистичний аналіз через взаємозв'язки між вагою тварин, станом опалення, внутрішньою температурою та швидкістю повітря у вентиляції.

Середні значення та стандартні відхилення виміряних концентрацій CO_2 і температури повітря в зоні перебування тварин з автоматичними вимірювальними системами наведені в таблиці 3 та на рис. 6. Середні значення коротко підсумовують роботу системи вентиляції в точках відбору проб. Значення стандартних відхилень вказують на варіацію даних і, як очікується, будуть високими, оскільки виміряні змінні безпосередньо пов'язані зі швидкістю повітря у вентиляції, яка змінюється впродовж партії та між партіями залежно від числа днів і зовнішнього клімату.

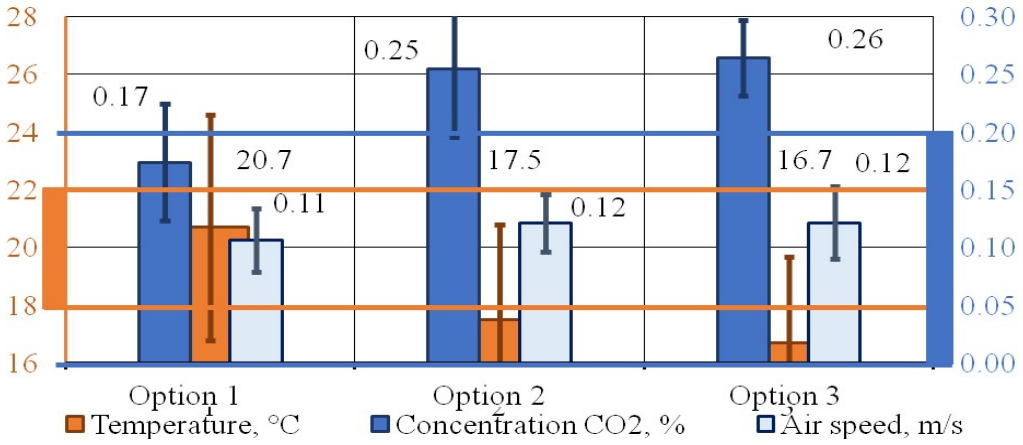
Таблиця 3 – Середнє значення автоматично зареєстрованої концентрації CO_2, температури в зоні перебування тварин та швидкості потоку повітря

Варіант системи вентиляції		Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу		Варіант 2 – стельова система вентиляції		Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали	
Партія		I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)	I (зимова)	II (літня)
Концентрація CO_2, мг/м^3	Сер.	2130	2177	3123	2642	3237	2562
	Відх.	617	830	721	832	403	707
Концентрація CO_2, %	Сер.	0,17	0,18	0,25	0,22	0,26	0,21
	Відх.	0,05	0,07	0,06	0,07	0,03	0,06
Температура, °С	Сер.	20,7	23,2	17,5	26,6	16,7	25,7
	Відх.	3,9	3,5	3,3	2,9	3	3,9
Швидкість потоку повітря, м^3/год на гол.	Сер.	5,1	12,3	5,8	12,4	5,8	13,9
	Відх.	1,3	3,3	1,2	4,1	1,5	3,8
Швидкість повітря, м/с	Сер.	0,11	0,26	0,12	0,26	0,12	0,29
	Відх.	0,03	0,07	0,03	0,09	0,03	0,08

Джерело: розроблено авторами

Найнижча середня швидкість вентиляції була виміряна в приміщенні з вентиляцією наземного каналу, де середня концентрація CO_2 в зоні перебування тварин була найнижчою.Найвища середня швидкість вентиляції була зафіксована в приміщенні з пористою стельовою вентиляцією, де середня концентрація CO_2 і температура повітря в зоні перебування тварин були найвищими. У партії 2 (літній період) у всіх приміщеннях внутрішня температура та середня швидкість вентиляції були вищими, ніж в інших партіях через вищі зовнішні температури, що призвело до нижчих концентрацій CO_2.

Отримані дані (рис. 6) демонструють невідповідність нормованим значенням показників мікроклімату в зоні перебування тварин в літній період для всіх варіантів систем вентиляції. Для зимового періоду виміряні параметри мікроклімату відповідають нормованим значенням лише для системи вентиляції наземного каналу.



Зимовий період (партія I)

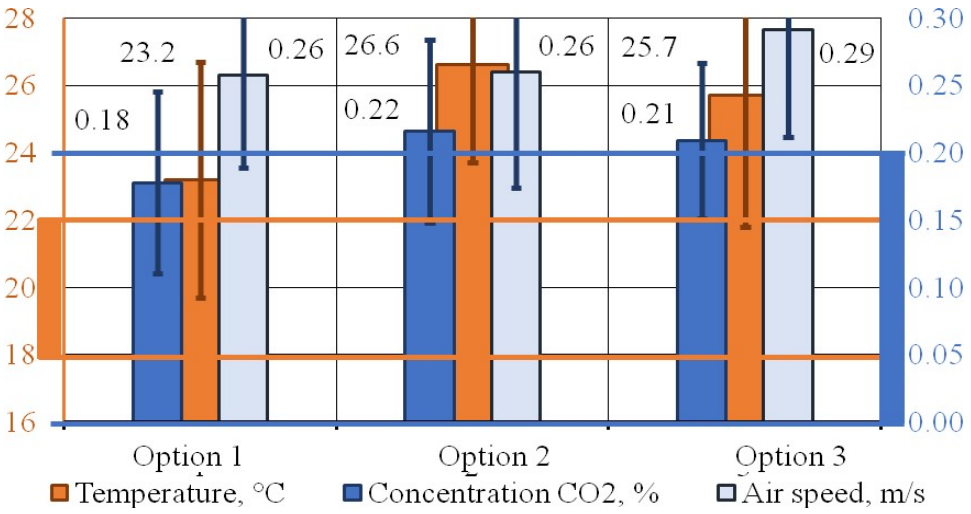


Рисунок 6 – Середнє значення автоматично зареєстрпбббної концентрації CO_2, температури в зоні перебування тварин та швидкості повітря

Джерело: розроблено авторами

Середні значення для ξ і ζ наведені в таблиці 3 та на рис. 7. У приміщенні з вентиляцією з наземного каналу значення ξ і ζ були найвищими, як і очікувалося. У приміщенні з пористою стельовою вентиляцією ξ був найнижчим. У всіх приміщеннях були відмінності між значенням ξ і значенням ζ, що вказує на те, що розподіл теплоти несхожий на розподіл CO_2. У всіх приміщеннях значення відхилення для ξ були вищими, ніж для ζ, оскільки концентрація CO_2 коливалася більше, ніж температура.

Для трьох приміщень у таблиці 4 наведено середні значення ξ на основі всіх зареєстрованих вручну концентрацій CO_2 і порівнюваних автоматично зареєстрованих концентрацій CO_2.

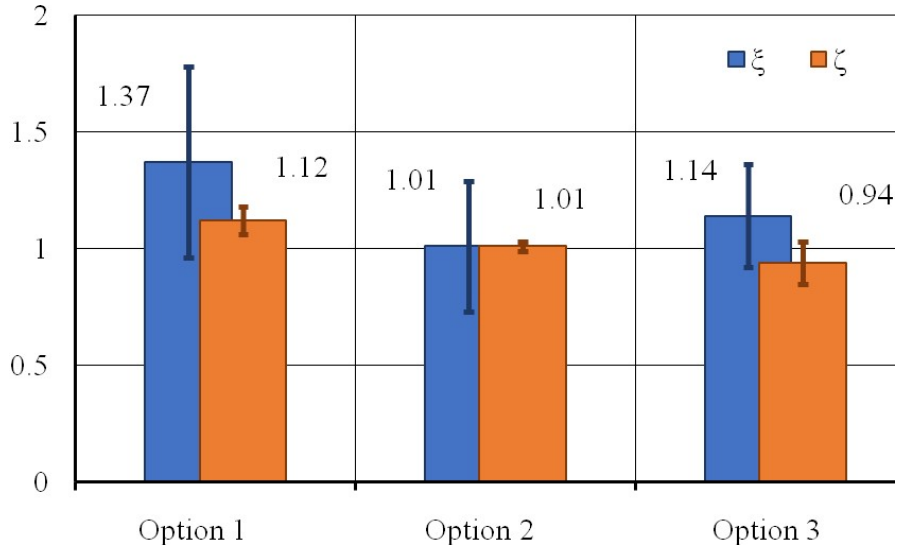
У приміщенні з системою вентиляції наземного каналу відмінності у значенні ξ серед різних точок відбору проб були найбільшими, як і очікувалося, оскільки вентиляція базується на витісненні повітря. Значення ξ було найвищим на Н1, оскільки ця точка відбору проб була розташована відносно близько до джерела свіжого повітря.

Таблиця 4 – Середні значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ з зоні перебування тварин

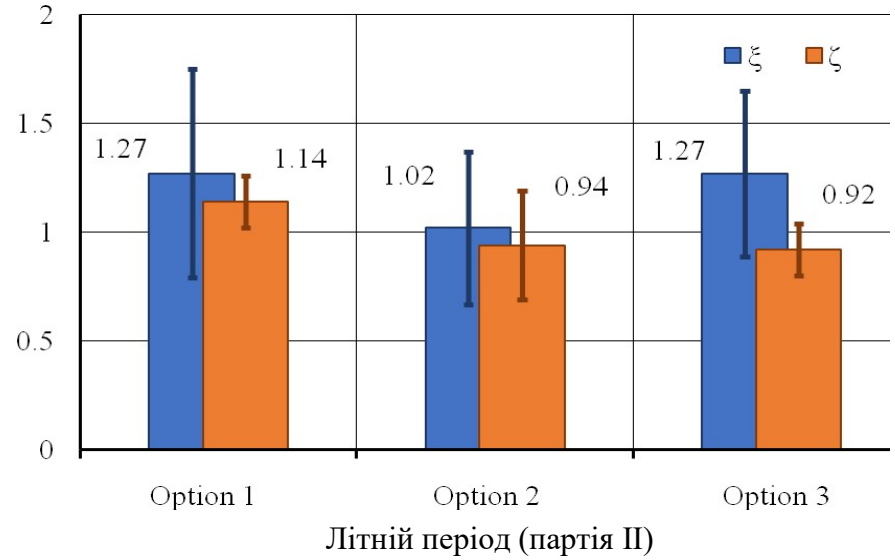
Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,37	0,41	1,12	0,06
II (літня)	1,27	0,48	1,14	0,12
Варіант 2 – стельова система вентиляції				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,01	0,28	1,01	0,02
II (літня)	1,02	0,35	0,94	0,25
Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали				
Партія	ξ		ζ	
	Середнє	Відхилення	Середнє	Відхилення
I (зимова)	1,14	0,22	0,94	0,09
II (літня)	1,27	0,38	0,92	0,12

Значення ξ було нижчим у точці відбору проб А2 і найнижчим у точці відбору проб Н2, тому що ці точки були розташовані посередині та в задній частині, ближче до вихідного отвору для повітря. Значення ξ зменшувалося, коли повітря протікало від передньої до задньої частини станка. Вплив кількості тварин поблизу точки відбору не враховувався (табл. 5).

У приміщенні зі стельовою системою вентиляції різниця в значенні ξ серед різних точок відбору проб була більшою, ніж очікувалося (табл. 5), що вказує на те, що повітря не було однорідним. Причиною цього стала тепловіддача тварин. У місцях відпочинку тварин відбувався висхідний потік повітря, що призводило до низхідного потоку свіжого повітря в місцях, де тварини не лежали. Кількість тварин навколо точки відбору Н4 була високою порівняно з кількістю тварин навколо точки відбору Н3 (табл. 5), що пояснює вище значення ξ в Н3. Це означає, що значення ξ в зоні перебування тварин зі стельовою системою вентиляції нижчі в місцях відпочинку (лежання) тварин.



Зимовий період (партія I)



Літній період (партія II)

Рисунок 7 – Середні значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ з зоні перебування тварин

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 5 – Середнє значення ефективності видалення забруднень ξ у різних точках відбору проб і середня кількість тварин у межах 1 м діаметра кола навколо точки відбору проб (середнє в зимовий і літній періоди)

Точка відбору проб	ξ		Кількість тварин
	Середнє	Відхилення	
Варіант 1 – система вентиляції наземного каналу			
A2	1,39	0,36	3,5
H1	1,81	0,95	4,7
H2	1,05	0,33	1,2
Варіант 2 – стельова система вентиляції			
A5	0,93	0,26	3,9
H3	1,31	0,45	2,1
H4	0,72	0,25	4,4
Варіант 3 – система вентиляції через стінові канали			
A8	1,23	0,22	3,3
H5	0,78	0,17	2,2
H6	1,15	0,35	1,6

У приміщенні з системою вентиляції через стінові канали значення ξ було найвищим у точці відбору проб A8 у задній частині одного станку. У точці відбору проб H5 значення ξ було значно нижчим, ніж у точках відбору проб H6 і A8. Це не очікувалося, але це можна пояснити структурою повітряного потоку. Коли свіже повітря надходило в приміщення, багато повітря надходило до кінця приміщення, поки воно не досягало торцевої стіни, особливо за високої швидкості повітря у вході. Це призвело до більшого витіснення повітря далі від каналів. Забруднене повітря з цих станків протікало назад до каналу через інші станки, що призвело до нижчого значення ξ у станках ближче до каналів. Значення ξ у точці H6 нижче, ніж у точці A8, що вказує на те, що концентрація CO_2 вища в передній частині, ніж у задній частині. Планування приміщення з сімома станками замість двох вплинуло на розподіл тварин як джерел CO_2 і теплоти в приміщенні.

Графічний аналіз впливу інтенсивності вентиляції на значення ефективності видалення забруднень ξ і ефективності відведення теплоти ζ для трьох приміщень представлено на рис. 8–10. Ліві осі показують середні значення ξ і ζ для класу вентиляції (0,43 $м^3$/год на тварину). Як згадувалося раніше, значення ξ має основне значення в періоди з низькою вентиляцією, а ζ – в періоди з високою вентиляцією. Праві осі на рис. 8–10 показують відсоток часу, протягом якого швидкість вентиляції була в межах певного класу вентиляції.

У приміщенні з системою вентиляції наземного каналу значення ζ було постійним, а значення ξ зменшувалося зі збільшенням швидкості потоку повітря (рис. 8). Причина такого зменшення значення ξ полягає в тому, що швидкість повітря у вхідному отворі призвела до того, що повітряний струмінь піднімався вище в приміщення зі збільшенням вентиляції, що змінило структуру повітряного потоку. При вищих показниках вентиляції значення ξ і ζ демонструють більшу дисперсію, оскільки було менше спостережень із високими показниками вентиляції.

Для стельової системи вентиляції ξ був відносно постійним зі збільшенням вентиляції, а ζ зменшувався зі збільшенням вентиляції (рис. 9). Це можна пояснити збільшенням короткого замикання повітряного потоку: частина свіжого повітря, що

надходить через стелю, видаляється з приміщення, не досягнувши зони перебування тварини, і без відведення теплоти від неї.

У приміщенні з системою вентиляції через стінові канали (рис. 10) зі збільшенням вентиляції ζ залишається майже на тому самому рівні, близькому до 1, оскільки значення ξ зростає. Причиною цього є швидкість повітря в каналах. Зі збільшенням вентиляції швидкість повітря в канал збільшується, що змінює структуру повітряного потоку, що призводить до більшого руху повітря в задній частині приміщення ближче до точки відбору.

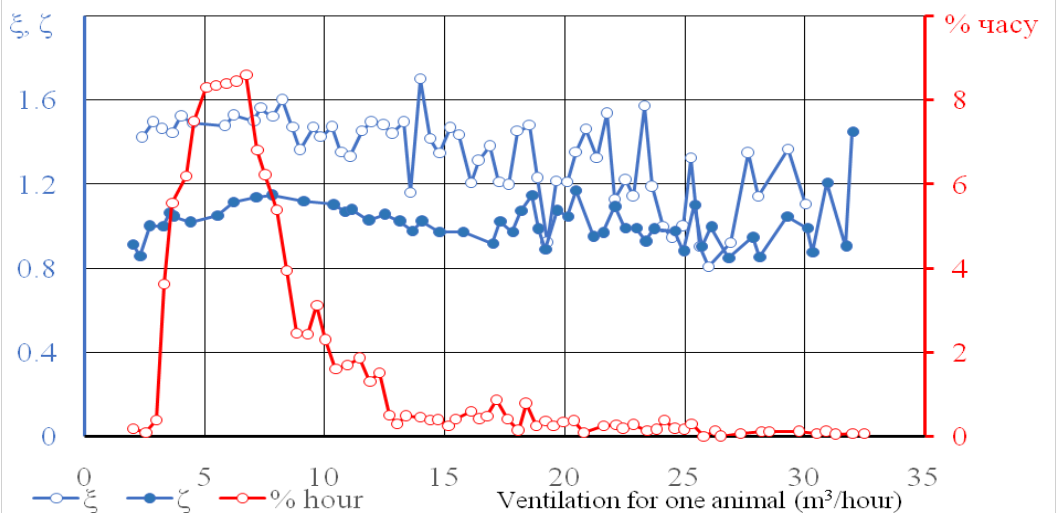


Рисунок 8 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із системою вентиляції наземного каналу (варіант 1)

Джерело: розроблено авторами

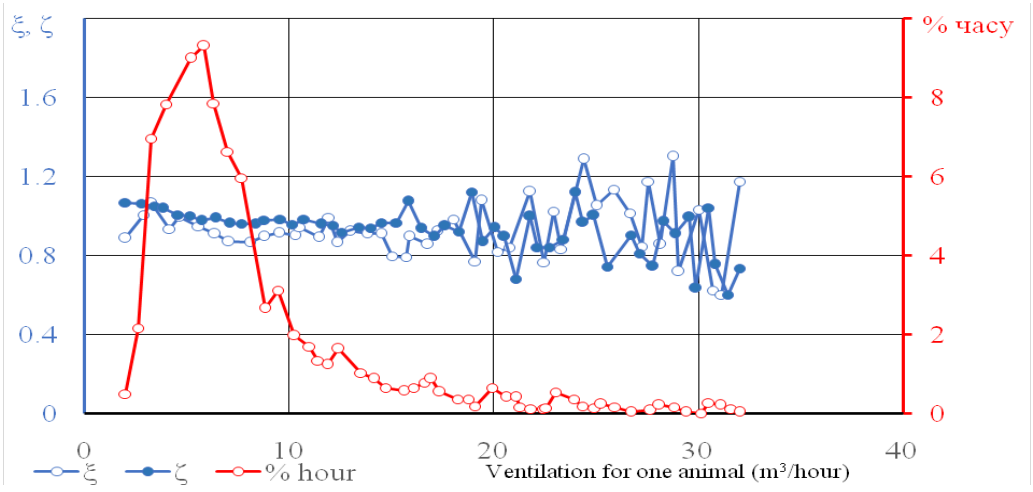


Рисунок 9 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із стельовою системою вентиляції (варіант 2)

Джерело: розроблено авторами

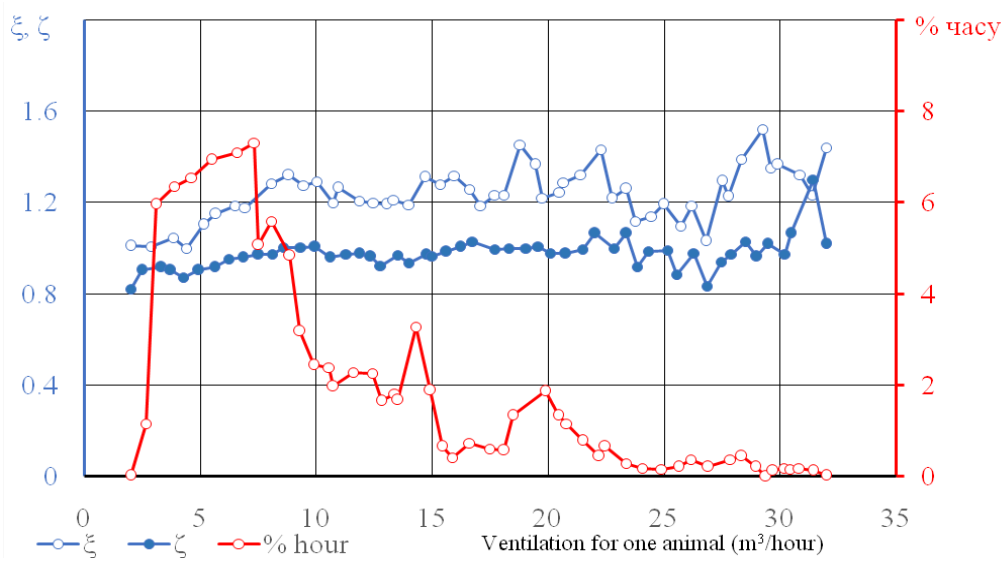


Рисунок 10 – Вплив інтенсивності вентиляції на значення ξ та ζ в точках автоматичного відбору проб і розподіл частоти інтенсивності вентиляції в приміщенні із системою вентиляції через стінові канали (варіант 3)

Джерело: розроблено авторами

Не виявлено жодного впливу зареєстрованого стану опалення приміщення на значення ξ та ζ. Вимірювальна система не змогла визначити цей ефект. Хоча момент надходження гарячої води в приміщення був зафіксований, це вказувало лише на час початку опалення; теплопередача продовжується після того, як гаряча вода перестає рухатися по трубах. Крім того, в приміщеннях з наземними каналами і стіновими каналами не проводилося розмежування між гарячим водяним підігрівом повітря в приміщенні і підігрівом підлоги.

Приміщення з наземною вентиляцією каналу показало найвище значення ξ і ζ і найнижчу концентрацію CO_2 в зоні перебування тварин, навіть якщо це приміщення мало найвищу концентрацію на вході. Вентиляція наземного каналу показала кращу якість повітря в зоні перебування тварин.

Конструкція системи вентиляції впливає на якість повітря в зоні перебування тварин. Очікується, що високе значення ξ, яке призводить до нижчих концентрацій забруднюючих речовин у холодних умовах з мінімальною вентиляцією, і високе значення ζ, що призводить до нижчих температур у теплих умовах із високою швидкістю вентиляції, покращать продуктивність тварин. Значення ξ та ζ не залежать виключно від конструкції вентиляційної системи. Одним із дуже важливих факторів є місце проведення вимірювань, що можна проілюструвати порівнянням результатів із різних точок відбору проб у кожному приміщенні. Середні значення ξ та ζ в зоні перебування тварин нададуть краще враження про ефективність витіснення повітря, але важко виміряти концентрацію CO_2.

Системи з високими значеннями ξ та ζ, що вказують на ефективну вентиляцію в зоні перебування тварин, можуть використовувати нижчі показники вентиляції. Це можна проілюструвати налаштуваннями приміщення, які використовувалися в цьому дослідженні: налаштування вентиляції, що використовувалися в приміщенні з вентиляцією із наземним і стінними каналами, були нижчими, ніж у приміщеннях з стельовою системою вентиляцією. Це може бути важливим аспектом у зниженні витрат на очищення повітря, що є одним із способів ефективного скорочення викидів із тваринницьких приміщень.

Ефективна вентиляція може бути реалізована, за умови розташування впускного отвору повітря поблизу зони перебування тварин. Це може збільшити ризик високої швидкості повітря або протягів у зоні перебування тварин. Якість повітря та тепловий комфорт є важливими чинниками у створенні здорового мікроклімату та запобіганні проблемам зі здоров'ям тварин, належним утриманням і неоптимальним виробництвом.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що для тваринницького приміщення із системою вентиляції наземного каналу забезпечується більше свіжого повітря в зоні перебування тварин, у порівняні зі стельовою системою вентиляції і системою вентиляції через стінові канали.

Для системи вентиляції наземного каналу та системи вентиляції через стінові канали на ефективність видалення забруднень ξ впливала швидкість вентиляції, яка значно залежить від віку тварини, її ваги та зовнішньої температури. Для системи вентиляції наземного каналу у виробничих умовах ефективність видалення забруднень ξ зменшувалася зі збільшенням швидкості потоку повітря у системі вентиляції. Для системи вентиляції через стінові канали ефективність видалення забруднень ξ збільшувалася зі збільшенням швидкості потоку повітря у вентиляції, оскільки точка відбору проб знаходилася в задній частині приміщення. У приміщенні зі стельовою системою вентиляції на ефективність видалення забруднень ξ суттєво впливала лежача поведінка тварин, і спостерігалося незначне зниження ефективності видалення забруднень ξ зі збільшенням вентиляції.

Дослідження виконувалися в межах науково-дослідної роботи за кошти державного бюджету України № 0123U101794 «Розробка комплексу техніко-технологічного забезпечення енерго- та ресурсоощадного виробництва продукції тваринництва у рамках ЄЗК».

Список літератури

1. Dovbnenko O. F. Results of manufacturing tests of the energy efficient microclimate providing system for protection of rolls. *Effective rabbit breeding and fur farming.* 2019. Vol. 5. P. 51–63. DOI: https://doi.org/10.37617/2708-0617.2019.5.51-64.
2. Patyka N., Khodakivska O., Pronko L., Kolesnyk T., Klymchuk O., Kamenschuk B., Zayed N. M. Approaches to evaluation of the agriculture competitiveness level: empirical evidense in Ukraine. *Academy of Strategic Management Journal*. 2021. Vol. 20, № 1. P. 1–15. URL: https://r.donnu.edu.ua/handle/123456789/1534.
3. Hmyria V., Baldynyuk V., Goncharenko M. Management of Agricultural Production Enterprises in the Globalization of the Economy: Current State and Development Prospects. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 295–303. DOI: https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.29.
4. Макаренко П. М., Калініченка О. В., Аранчій В. І. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти : колективна монографія. ПП «Астрая», 2019. 603 с. URL: https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29381/1/1.pdf.
5. Heßling M., Hönes K., Vatter P., Lingenfelder C. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS Hygiene and Infection Control*. 2020. Vol. 15. PMC7273323. DOI: https://doi.org/10.3205/dgkh000343.
6. Алієв Е. Б., Яропуд В. М., Білоус І. М. Обґрунтування складу енергозберігаючої системи забезпечення мікроклімату в свинарських приміщеннях. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2020. № 2 (97). С. 129–137.
7. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Теоретичні дослідження пневмовтрат повітряного теплообмінника побічно-випарного типу тваринницьких приміщень. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2021. Вип. 12. № 4. С. 35–41.
8. AdamchukV., DovbnenkoO., Danik Yu., Skydan O. Technological aspects of energy-efficient high-quality cleaning of indoor air from harmful impurities. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, № 4. P. 17–24. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor.24(4).2021.17-24.
9. Kaletnik H., Yaropud V. Research of pressure losses and justification of forms of sideevaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 7, P. 247–252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46.

10. Randazzo T., De Cian E., Mistry N. M. Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries. *Economic Modelling*. 2020. Vol. 90. P. 273–287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001.
11. Arun B. S., Mariappan V., Maisotsenko V. Experimental study on combined low temperature regeneration of liquid desiccant and evaporative cooling by ultrasonic atomization. *International Journal of Refrigeration.* 2020. Vol. 12. P. 100–109. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.023.
12. Довбненко О. Ф. Обґрунтування технічних та технологічних параметрів електротехнічної системи очищення повітря тваринницьких приміщень від шкідливих домішок. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. № 13 (112), С. 180–186. DOI: https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-20.
13. Yaropud V., Kupchuk I., Burlaka S., Poberezhets J., Babyn I. Experimental studies of design-and-technological parameters of heat exchanger. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 10, № 98. P. 57–60. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2022.10.10.
14. Яропуд В. М. Дослідження процесу функціонування та оптимізація конструктивно-технологічних параметрів тритрубного рекуператора. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2020. №1 (108). С. 23–32. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-16
15. Zhu G., Chow T.-T., Maisotsenko V.S., Wen T. Maisotsenko power cycle technologies: Research, development and future needs. *Applied Thermal Engineeringthis link is disabled*. 2023.Vol. 223. 120023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120023.
16. Іванюта С. П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. НІСД. 2020. 110 с.
17. Vinnytsia weather archive. URL:https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/vinnytsia_ukraine_689558?fcstlength=1y&year=2022&month=7. (дата звернення: 30.10.2023).

References

1. Dovbnenko, O.F. (2019). Results of manufacturing tests of the energy efficient microclimate providing system for protection of rolls. *Effective rabbit breeding and fur farming, 5*, 51-63. DOI: https://doi.org/10.37617/2708-0617.2019.5.51-64. [in English].
2. Patyka, N., Khodakivska, O., Pronko, L., Kolesnyk, T., Klymchuk, O., Kamenschuk, B. & Zayed, N. M. (2021). Approaches to evaluation of the agriculture competitiveness level: empirical evidense in Ukraine. *Academy of Strategic Management Journal*, *20(1),* 1-15. Retrieved from https://r.donnu.edu.ua/handle/123456789/1534. [in English].
3. Hmyria, V., Baldynyuk, V. & Goncharenko, M. (2023). Management of Agricultural Production Enterprises in the Globalization of the Economy: Current State and Development Prospects. *Review of Economics and Finance*, *21,* 295-303. DOI: https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.29. [in English].
4. Makarenko, P. M., Kalinichenka, O. V. & Aranchii, V. I. (2019). *Enerhoefektyvnist ta enerhozberezhennia: ekonomichnyi, tekhniko-tekhnolohichnyi ta ekolohichnyi aspekty : kolektyvna monohrafiia [Energy efficiency and energy saving: economic, technological and ecological aspects: collective monograph]*. PP «Astraia». Retrieved from https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/29381/1/1.pdf. [in Ukrainian].
5. Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P. & Lingenfelder, C. (2020). Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS Hygiene and Infection Control*, *15,* PMC7273323. DOI: https://doi.org/10.3205/dgkh000343. [in English].
6. Aliiev, E.B., Yaropud, V.M. & Bilous, I.M. (2020). Obgruntuvannia skladu enerhozberihaiuchoi systemy zabezpechennia mikroklimatu v svynarskykh prymishchenniakh [Justification of the composition of the energy saving system of microclimate support in pig farms]. *Vibrations in engineering and technology*, *2 (97),* 129-137. DOI:10.37128/2306-8744-2020-2-14. [in Ukrainian].
7. Kaletnik, G.M. & Yaropud, V.M. (2021). Teoretychni doslidzhennya pnevmovtrat povitryanoho teploobminnyka pobichno-vyparnoho typu tvarynnyts′kykh prymishchen [Theoretical studies of pneumatic losses of the air heat exchanger of the indirect-evaporative type of livestock premises]. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, *12 (4),* 35–41. [in Ukrainian].
8. Adamchuk, V., Dovbnenko, O., Danik, Yu. & Skydan, O. (2021). Technological aspects of energy-efficient high-quality cleaning of indoor air from harmful impurities. *Scientific Horizons, 24(4),* 17-24. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor.24(4).2021.17-24. [in English].
9. Kaletnik, H. & Yaropud, V. (2023). Research of pressure losses and justification of forms of sideevaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przeglad Elektrotechniczny*, *99(7),* 247-252. DOI: 10.15199/48.2023.07.46. [in English].

10. Randazzo, T., De Cian, E. & Mistry, N. M. (2020). Air conditioning and electricity expenditure: The role of climate in temperate countries. *Economic Modelling*, *90,* 273-287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.05.001. [in English].
11. Arun, B.S., Mariappan, V. & Maisotsenko, V. (2020). Experimental study on combined low temperature regeneration of liquid desiccant and evaporative cooling by ultrasonic atomization. *International Journal of Refrigeration, 12,* 100-109. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.023. [in English].
12. Dovbnenko, O.F. (2021). Obgruntuvannia tekhnichnykh ta tekhnolohichnykh parametriv elektrotekhnichnoi systemy ochyshchennia povitria tvarynnytskykh prymishchen vid shkidlyvykh domishok [Justification of the technical and technological parameters of the electrotechnical system for cleaning the air of livestock premises from harmful impurities]. *Mechanization and electrification of agriculture,13(112),* 180-186. DOI: https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-20. [in Ukrainian].
13. Yaropud, V., Kupchuk, I., Burlaka, S., Poberezhets, J. & Babyn, I. (2022).Experimental studies of design-and-technological parameters of heat exchanger. *Przeglad Elektrotechniczny*, *10(98),* 57-60. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2022.10.10. [in English].
14. Yaropud, V.M. (2020). Doslidzhennia protsesu funktsionuvannia ta optymizatsiia konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv trytrubnoho rekuperatora [Research of the functioning and optimization process of the structural-technological parameters]. *Engineering, Energy, Transport AIC*, *1(108),* 23-32. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-16. [in Ukrainian].
15. Zhu, G., Chow, T.-T., Maisotsenko, V.S. & Wen, T. (2023). Maisotsenko power cycle technologies: Research, development and future needs. *Applied Thermal Engineeringthis link is disabled*, *223,* 120023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120023. [in English].
16. Ivaniuta, S.P., Kolomiiets, O.O., Malynovska, O.A. & Yakushenko, L.M. (2020). *Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. Dopovid [Climate Change: Consequences and Adaptation Measures: Analyt.report]*. NISD. [in Ukrainian].
17. Vinnytsia weather archive. *meteoblue.com*. Retrieved from https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/vinnytsia_ukraine_689558?fcstlength=1y&year=2022&month=7.

Hryhorii Kaletnik, Prof., DSc.,
Vitalii Yaropud, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Experimental Studies of the Effectiveness of Systems for Providing Negative Pressure Microclimate in Livestock Premises

The microclimate of livestock premises is determined by a set of physical, chemical and biological parameters inside the premises for keeping animals and is characterized by the following parameters: air temperature, internal surfaces of walls, ceilings, floors, windows, doors, and other internal structures; humidity of air, internal surfaces of walls, ceiling, floor, windows, doors, and other internal structures; the speed and direction of air flows in the locations of animals, manure, inflow and exhaust channels, windows and doors; the gas composition of the air - the concentration of carbon dioxide, ammonia, hydrogen sulfide, carbon monoxide; the presence of dust and microorganisms in the air; the intensity of natural and artificial lighting; optical radiation; the level of industrial noise, the degree of air ionization.

The substantiation of the rational scheme of the negative pressure microclimate system in livestock premises on the basis of production surveys is the main goal of the conducted research. According to the results of the research, it was found that for the livestock room with the ventilation system of the ground channel, more fresh air is provided in the area where the animals are staying, in comparison with the ceiling ventilation system and the ventilation system through the wall channels.

For the ground duct ventilation system and the wall duct ventilation system, the efficiency of contaminant removal was influenced by the ventilation rate, which is significantly dependent on the animal's age, weight, and outdoor temperature. For the ventilation system of the above-ground channel in production conditions, the efficiency of pollution removal decreased with an increase in the speed of the air flow in the ventilation. For the wall duct ventilation system, the efficiency of pollutant removal increased as the ventilation air flow rate increased, as the sampling point was located at the back of the room. In a room with a ceiling ventilation system, the efficiency of contaminant removal was significantly influenced by the lying behavior of animals, and a slight decrease in the efficiency of contaminant removal was observed with increasing ventilation.
air, temperature, humidity, speed, pollution, ventilation, numerical simulation

Одержано (Received) 04.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 15.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 633.522 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.85-93

В.О. Шейченко, проф., д-р техн. наук
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
e-mail: vsheychenko@ukr.net
С.П. Коропченко, ст. наук. співр., канд. техн. наук
Інститут лубяних культур НААН України, м. Глухів, Україна
e-mail: pererobka-ilk@i.ua
І.А. Дудніков, доц., канд. техн. наук, **Ю.Б. Скоряк**, асп.
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
e-mail: igor.dudnikov@pdau.edu.ua, *e-mail: yuliia.skoriak@pdau.edu.ua*
Я.М. Сало, зав. лаб.
Львівська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, с.Магерів, Україна

Техніко-технологічні рішення інтенсифікації перероблення конопляної сировини

Розроблено технологію перероблення конопляної соломи в однотипний луб із заданим вмістом костриці та довжиною. Встановлено, що збільшення інтенсивності дій робочих органів на оброблюваний луб зменшує вміст костриці як у крупностебловій так і у дрібностебловій фракціях стебел. Закостриченість лубу характеризувалася: для дрібностеблової фракції – 13,8, середньостеблової – 11,2, крупностеблової – 10,8%, відповідно. Використання другого та третього етапів перероблення забезпечує одержання лубу з закостриченістю 0,8, 1,7 і 1,9%, відповідно.

Розроблено експериментальну універсальну лінію виробництва однотипного волокна із трести конопель, соломи конопель, трести льону-довгунця із стандартними показниками якості – рівнем закостриченності волокна та лубу конопель не більше 5%.

Розроблено та виготовлено лінію перероблення луб'яних культур. До основних переваг лінії віднесено: можливість використання в невеликих господарствах, перероблення трести конопель різної якості та ступеня вилежуваності, простота конструкції, низькі показники металоємності та енергоспоживання, невеликі габарити, можливість переробляти сировину як з рулону, так і з тюка, одержання волокна або лубу з низьким відсотком закостриченості (не перевищує 5%, а за умов перероблення трести зимового приготування – до 1%), висока продуктивність (перероблення до 1тони трести за годину).

технічні коноплі, технології збирання, технології первинної переробки конопель, обладнання виробництва однотипного волокна

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій первинної та вторинної переробки усіх складових рослини промислових конопель став основним стимулюючим чинником суттєвого розширення напрямків їх використання. За таких умов подальше динамічне збільшення обсягів виробництва конопляної продукції широкого спектру використання потребує відповідних техніко-технологічних рішень, направлених на підвищення якості сировини. Ця сировина повинна володіти широким спектром споживчих властивостей та відповідним діапазоном їх кількісних і якісних характеристик. Такі обставини обумовлюють пошук більш системних рішень щодо обґрунтування відповідних енергоощадних технологій збирання, первинної переробки та технічних засобів для їх здійснення.

Аналіз основних досліджень і публікацій. На первинну переробку сировина надходить в тюках або рулонах [1, 2]. Рівень вилежуваності та закостриченостісировини визначають в залежності від технологій збирання, видів технологічних операцій та їх кількості [3-5].

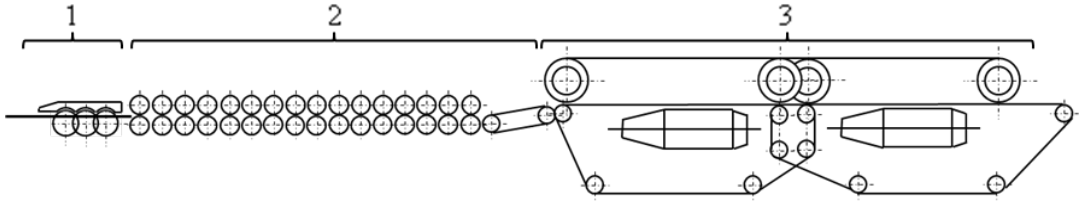
© В.О. Шейченко, С.П. Коропченко, І.А. Дудніков, Ю.Б. Скоряк, Я.М. Сало, 2023

Розрізняють наступні технології перероблення сировини:

- одержання довгого волокна;
- одержання волокна з хаотично розташованим волокнами в масі (однотипне).

Довге волокно одержують за допомогою обладнання, яке потребує перероблення сировини із паралельністю стебел. Таке обладнання складається з ліній:

- м'яльно-тіпального агрегату, на якому виробляється довге паралізоване волокно (рис. 1);
- ліній короткого волокна, які переробляють відходи тіпання (рис. 2).



1 – шароформуюча машина; 2 – м'яльна машина; 3– тіпальна машина

Рисунок 1 – Схема агрегату для виділення довгого волокна

Джерело: розроблено автором

Лінії для виділення довгого волокна конопель формують у складі шароформуючої машини з зубчатими дисками типу СПК-2, м'яльної машини ПМГ-1, тіпальної машини ШПО-2 або ТДК [5-6].

Тіпальна машина призначена для оброблення конопляної трести і відноситься до машин двосторонньої дії. Пропускна спроможність, за умов перероблення конопель, від 900 кг/год залежить від сировини та організації проведення технологічного процесу.

До ліній з перероблення відходів тіпання, плутанини та кудельної трести конопель відносять куделеприготувальні машини. Типовим представником зазначеного типу машин є КПП-3, що має продуктивність, за умов перероблення відходів тіпання, близько 250 кг/год волокна та низькосортної трести – 80-140 кг/год. Машина складається з двох секцій. До складу першої секції входить живильний транспортер 1 (рис. 2), кілковий барабан 2, призначений для стоншування шару відходів тіпання, м'яльна 3, тіпальна 4 і трясильна 5 частини. Другу секцію з'єднано з першою стрічковим передавальним транспортером. Ця секція складається з м'яльної та трясильної частин і виносного транспортера.

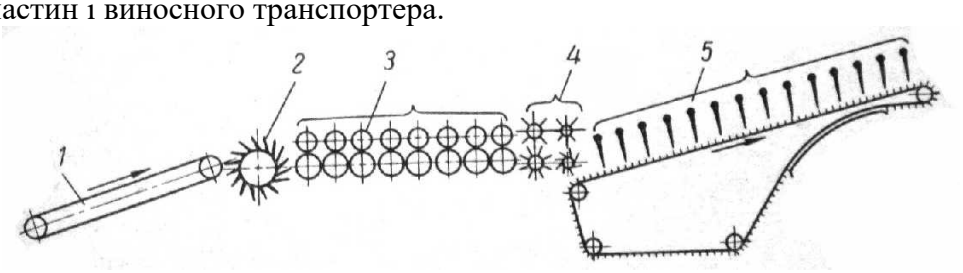


Рисунок 2 – Технологічна схема першої секції машини КПП-3

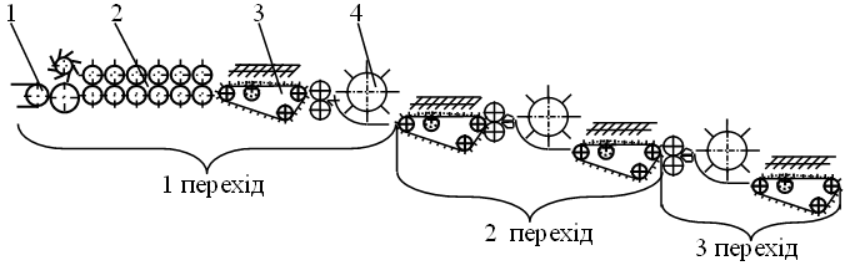
Джерело: розроблено автором

Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення ефективності виробництва коноплепродукції із сировини, одержаної за новими технологіями збирання, завдяки техніко-технологічному оновленню її галузі перероблення.

Виклад основного матеріалу. Інститутом луб'яних культур НААН України проведено низку досліджень, направлених на одержання однотипного волокнистого матеріалу із сировини, яку отримано за технологіями, що передбачають використання с.-г. машин загального призначення. Розроблено технологічні процеси та комплекти

обладнання, у яких відсутнє затиснення сировини, а необхідний рівень очищення і довжина волокнистих комплексів забезпечуються поступовим збільшенням кількості впливів на оброблюваний матеріал. Технічними рішеннями, в залежності від потреби споживача, передбачено комплектування як стаціонарних, так і мобільних переробних комплексів.

Розроблено технологію отримання лубу, у якій передбачено перероблення сухої маси із хаотичним розташування стебел конопель. Запропоновані техніко-технологічні рішення уможливили комплексно механізувати процеси як збирання, так і первинної переробки стебел [1, 2]. Відмічені технології базуються на використані як добре відомих, широко апробованих і удосконалених механічних дій на стебла, так їх комбінацій: м'яльно-скребкових, тіпально-чесальних, трясильно-вібраційних. Проведеними дослідженнями встановлено, що застосування в декілька переходів тіпально-чесальних та трясильно-вібраційних операцій уможливило отримання лубу із заданими параметрами за довжиною та вмістом костриці (рис. 3).



1 – живильна, 2 – м'яльна, 3 – трясильно-вібраційна, 4 – тіпально-чесальна частини

Рисунок 3 – Принципова технологічна схема виділення лубу конопель

Джерело: розроблено автором

Використання м'яльно-скребкових дій забезпечує ефективне руйнування зв'язків між луб'яним шаром і деревиною. Це сприяє зниженню вмісту залишкової костриці в лубі на подальших етапах. На другому етапі поряд із руйнуванням зв'язків між луб'яним шаром і деревиною здійснюють очищення сировини. Досягається це завдяки високошвидкісним діям тіпально-чесального барабану. Остаточне очищення лубу від костриці здійснюють поєднанням спільних впливів трясіння та вібрації, що дозволяє інтенсифікувати видалення вільної костриці із зони оброблення.

Проведеними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням інтенсивності дії робочих органів на оброблюваний луб за переходами сировини, вміст костриці в ній зменшується як у крупностебловій так і у дрібностебловій фракціях стебел. Основний обробіток стебел відбувається на першому переході. За таких умов закостриченість лубу характеризувалася наступними показниками: для дрібностеблової фракції – 13,8, середньостеблової – 11,2, крупностеблової – 10,8%, відповідно. Використання другого та третього етапів перероблення забезпечує одержання лубу з закостриченістю 0,8, 1,7 і 1,9%, відповідно (рис. 4).

Встановлено, що збільшення інтенсивності оброблення призводить до відповідного зменшення середньовагової довжини лубу для всіх вибраних фракцій. Луб за таких умов стає м'якшим (рис. 5).

Таким чином, запропонована технологія перероблення конопляної соломи дозволяє одержувати однотипний луб в залежності від кількості переходів із заданими параметрами за вмістом костриці та довжиною.

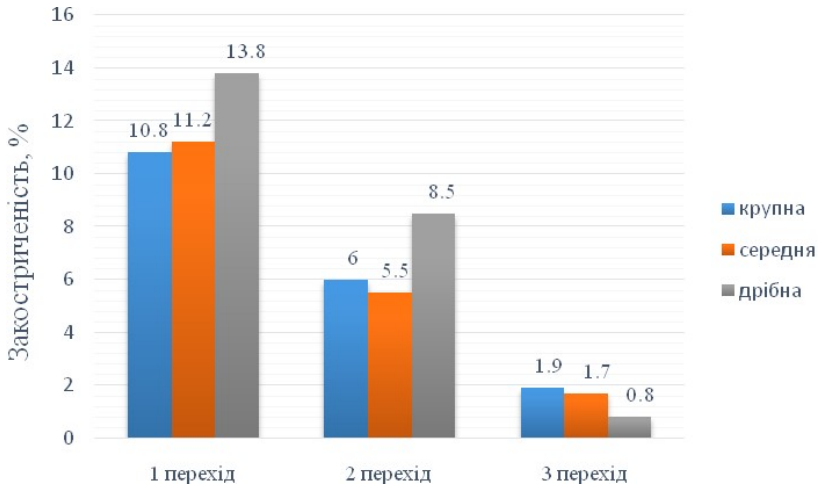


Рисунок 4 – Динаміка змінення закостриченості лубу за етапами перероблення
Джерело:[2]

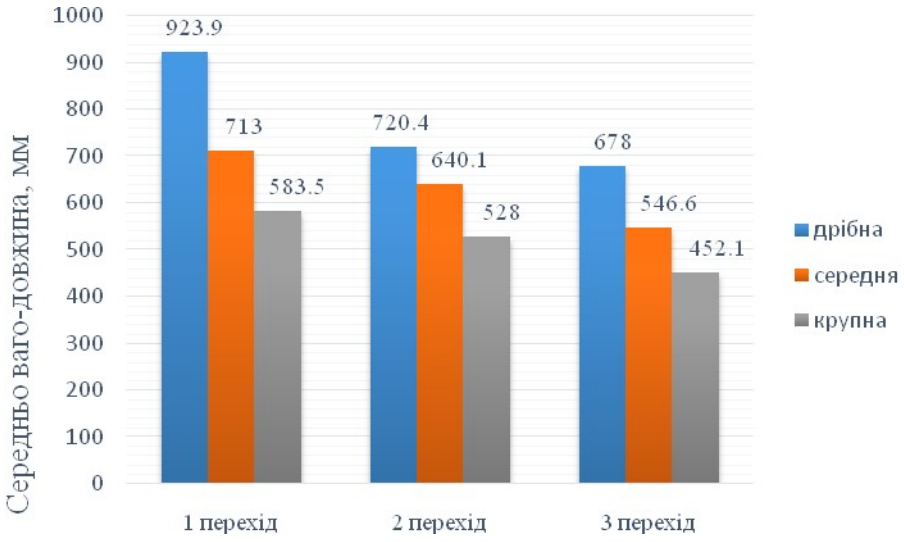


Рисунок 5 – Розподіл середньовагової довжини лубу за переходами
Джерело:[2]

Для перероблення трести різної якості і ступеня вилежуваності запропоновано технологію одержання однотипного волокна (рис. 6), яка включає наступні процеси: розмотування рулону або розбирання тюка, формування шару сировини до перероблення, м'яття, тіпання, трясіння, пакування готового волокна, видалення одержаної костриці, відведення пилу.

Виробництво однотипного волокна за даною технологією, передбачає перероблення сировини, стебла у якій не є паралельними. Використання при проведенні збиральних робіт потужних, доступних машин і агрегатів, що широко застосовують у технологіях збирання різноманітних сільськогосподарських культур, уможливило суттєво зменшити витрати на реалізацію технологічних операцій збирання конопель. Варто відзначити, що використання сировини з хаотичним розташуванням стебел у масі не виключає інтенсифікацію впливів на матеріал. За таких перспективних

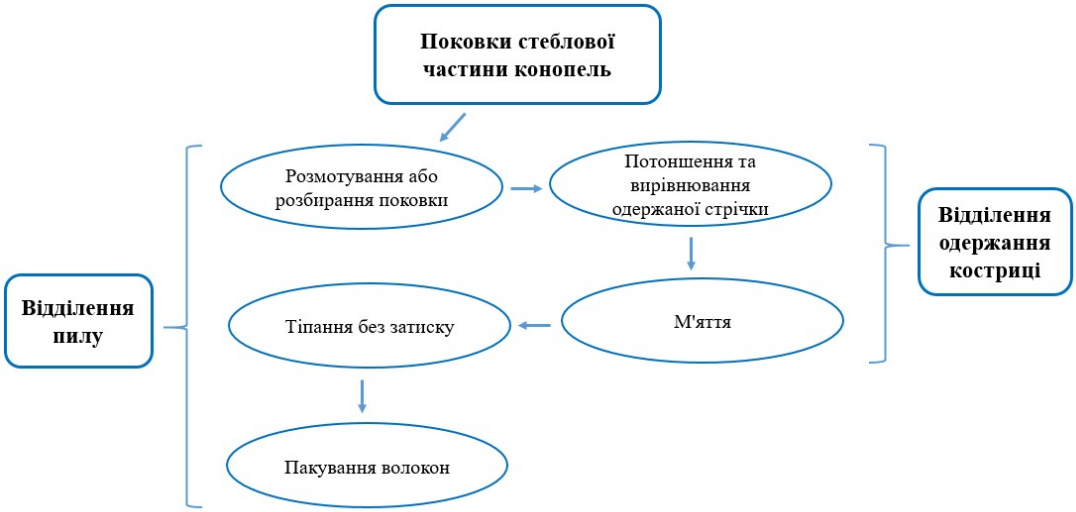
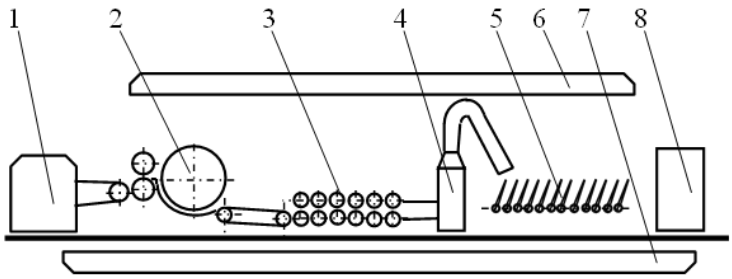


Рисунок 6 – Схематичне зображення технології одержання однотипного волокна
Джерело: розроблено автором

умов зменшується кількість операцій з перероблення сировини, металоємність і енергоспоживання переробного обладнання. Волокно, отримане за відзначеноютехнологією, має великий спектр використання у різних галузях народного господарства.

Технічну реалізацію технології одержання однотипного волокна проведено у декілька етапів. Серед них: розроблення схеми, відпрацювання робочих органів, обґрунтування режимів функціонування агрегату (рис. 7). Згідно до розробленої схеми на першому етапі перероблення формують шар сировини з рулону або тюка. Для цього використовують дії шароформуючої машини, де завдяки її робочим органам потоншують і збагачують шар сировини. Потім сировину подають у м'яльну машину. Внаслідок інтенсивного впливу м'яльно-скребкових дій рифлених вальців на стебла відбувається руйнування зв'язків між волокном та деревиною. Пром'ятий сирець надходить до дезінтегратору, де відбувається відділення залишків костриці від волокна, з одночасним частковим зменшенням довжини волокнистих комплексів. На останньому етапі перероблення завдяки дії робочих органів трясильної машини відбувається очищення волокна від насипної костриці.

Технологічна схема розробленої експериментальної лінії одержання однотипного волокна (рис. 7) складається з таких ділянок: розмотувач, шароформуюча машина, м'яльна машина, дезінтегратор, трясильна машина, система вентиляції, система видалення костриці, пресування волокна.



1 – розмотувач; 2 –шароформуюча машина; 3 – м'яльна машина; 4 – дезінтегратор;
5 – трясильна машина; 6 – система вентиляції; 7 – система видалення костриці; 8 – пресування волокна
Рисунок 7 – Технологічна схема експериментальної лінії одержання однотипного волокна
Джерело: розроблено автором

Дослідженнями експериментальної лінії одержання однотипного волокна встановлено спроможність перероблення лубоволокнистої сировини різної якості. Цю сировину можливо одержувати за технологіями збирання, які базуються на використанні сільськогосподарських машин загального призначення. Експериментальна лінія передбачає перероблення соломи, трести різних способів приготування та вилежуваності. Також отримано позитивні результати за умов перероблення трести льону (табл. 1). Сировина на перероблення надходила у рулонах з хаотичним розташуванням стебел у масі.

Таблиця 1 – Показники якості волокна за результатами перероблення сировини різної якості експериментальною лінією одержання однотипного волокна

Сировина	Показники якості			
	Розривне навантаження скрученої стрічки, даН	Масова частка, %		Сорт (для конопель). Номер (для льону-довгунця).
		костриці	лапи (для конопель)	
Треста конопель	18,7	1,0	1,6	3
Солома конопель	26,4	2,1	4,3	2
Треста льону-довгунця	11,5	12,5	-	3

Джерело: розроблено автором

За результатами проведених досліджень відмічено універсальність експериментальної лінії, що уможливило перероблення вибраного виду сировини (трести конопель, соломи конопель, трести льону-довгунця) в однотипну волокнисту масу. За таких умов показники якості відповідали стандартним, а закостриченість волокна та лубу конопель не перевищувала 5%. Для одержання волокна льону з низькою закостриченістю доцільно продовжити дослідження, у яких передбачити збільшення дій на оброблюваний матеріал.

З метою втілення в життя запропонованої технології переробки Інститутом луб'яних культур НААН спільно з компанією «ХЕМТЕХНО» розроблено та виготовлено лінію перероблення луб'яних культур (рис. 8).



Рисунок 8 – Загальний вигляд лінії перероблення луб'яних культур

Джерело:[6]

Лінія для перероблення луб'яних призначена для виробництва однотипного волокна з трести промислових конопель (табл. 2). Лінія переробляє вихідну сировину у вигляді сформованої поковки у вигляді рулону або тюка зі стебел із хаотичним розташуванням їх у шарі. За результатами перероблення трести різної якості одержують волокно різної довжини та розщепленості із закостриченням не більше 5%.

Таблиця 2 – Технічна характеристика лінії ЛПЛ

№ п/п	Показник	Значення
1	Розрахункова продуктивність ЛПЛ (переробка вхідної сировини), т/год	до 1
2	Закостриченість волокна, %	0-5
3	Потужність електрообладнання (без системи аспірації пилу), кВт	35
4	Рекомендована кількість операторів, чол	5
5	Габарити лінії: довжина, м ширина, м висота, м	 20 4 5

Джерело: розроблено автором

До основних переваг лінії віднесено: можливість використання в невеликих господарствах, перероблення трести конопель різної якості та ступеня вилежуваності, простота конструкції, низькі показники енергоспоживання (в межах 80 кВт), невеликі габарити, можливість переробляти сировину як з рулону, так і з тюка, одержання волокна з низьким відсотком закостриченості, що не перевищує 5%, а за умов перероблення трести зимового приготування – до 1%), висока продуктивність до 1тони трести за годину.

Висновки за результатами проведених досліджень:

1. Розроблено технологію перероблення конопляної соломи в однотипний луб із заданими параметрами за вмістом костриці та довжиною. Встановлено, що зі збільшенням інтенсивності дій робочих органів на оброблюваний луб за переходами сировини, вміст костриці в ній зменшується як у крупностебловій, так і у дрібностебловій фракціях стебел. Основний обробіток стебел відбувається на першому переході. За таких умов закостриченість лубу характеризувалася наступними показниками: для дрібностеблової фракції – 13,8, середньостеблової – 11,2, крупностеблової – 10,8%, відповідно. Використання другого та третього етапів перероблення забезпечує одержання лубу з закостриченістю 0,8, 1,7 і 1,9%, відповідно.

2. Розроблено технологію та комплект обладнання одержання однотипного волокна із сировини, яку отримано завдяки збиранню трести у весняний період. Запропонована технологія включає процеси розмотування рулону або розбирання тюка, формування шару сировини до переробки, м’яття, тіпання, трясіння, пакування готового волокна, видалення одержаної костриці, відведення пилу. В залежності від потреби споживача технічними рішеннями передбачено комплектування як стаціонарних, так і мобільних переробних комплексів.

3. Розроблено експериментальну універсальну лінію виробництва однотипного волокна із трести конопель, соломи конопель, трести льону-довгунця зі стандартними показниками якості, а також рівнем закостриченності волокна та лубу конопель не більше 5%.

4. Розроблено та виготовлено лінію перероблення луб'яних культур. До основних переваг лінії віднесено: можливість використання в невеликих господарствах, перероблення трести конопель різної якості та ступеня вилежуваності, простота конструкції, низькі показники металоємності та енергоспоживання, невеликі габарити, можливість переробляти сировину як з рулону, так і з тюка, одержання волокна або лубу з низьким відсотком закострищеності (не перевищує 5%, а за умов перероблення трести зимового приготування – до 1%), висока продуктивність (перероблення до 1тони трести за годину).

Список літератури

1. Вировець В.Г., Баранник В.Г., Гілязетдінов Р.Н. Коноплі: монографія / за ред. М.Д. Мигаля, В.М. Кабанця. Суми : Видавничий будинок "Еллада", 2011. 384 с. URL: http://surl.li/draag (дата звернення: 20.10.2023).
2. Вировець В.Г., Лайко І.М., Мигаль М.Д., Коропченко С.П. Коноплярство: наукові здобутки і перспективи: монографія / за ред. І.О. Маринченка, Guo Chunjing. Суми : ФОП Щербина І.В., 2018. 158 с.
3. Sheichenko V., Marynchenko I., Dudnikov I., Korchak M. Development of technology for the hemp stalks preparation. *Indep. J. Manag. Prod.* 2019. Vol. 10. P. 687–701. URL: http://surl.li/mumup (дата звернення: 20.10.2023).
4. Коропченко С.П., Мохер Ю.В. Підсумки науково-дослідних робіт з механічної переробки конопель на підприємствах малого та середнього бізнесу. *Engineering sciences: development prospects in countries of Europeat the beginning of the third millennium: Collective monograph.* 2018. Vol. 2. Riga : Izdevnieciba "BaltijaPublishing". P. 112-137. URL: http://surl.li/mumue (дата звернення: 24.10.2023).
5. Довідник конопляра / І.О. Маринченко та ін. Суми, 2017. 18 с.
6. Лінія переробки луб'яних культур – високоефективне обладнання для одержання конопляного волокна. *Інститут луб'яних культур*: веб-сайт. URL: http://surl.li/muivj (дата звернення: 30.10.2023).

References

1. Vyrovets, V.H., Barannyk, V.H. & Hiliazetdinov, R.N. (2011). *Konopli* [*Hemp*]. M.D. Myhalia, V.M. Kabantsia (Eds.). Sumy : Vydavnychyi budynok "Ellada". Retrieved from http://surl.li/draag [in Ukrainian].
2. Vyrovets, V.H., Laiko, I.M., Myhal, M.D. & Koropchenko, S.P. (2018). *Konopliarstvo: naukovi zdobutky i perspektyvy* [*Hemp growing: scientific achievements and prospects*]. I.O. Marynchenka (Eds.). Guo Chunjing. Sumy : FOP Shcherbyna I.V. [in Ukrainian].
3. Sheichenko V., Marynchenko I., Dudnikov I., Korchak M. Development of technology for the hemp stalks preparation. Indep. J. Manag. Prod. 2019. Vol. 10. P. 687–701. Retrieved from http://surl.li/mumup [in English].
4. Koropchenko, S.P. & Mokher, Yu.V. (2018). Pidsumky naukovo-doslidnykh robit z mekhanichnoi pererobky konopel na pidpryiemstvakh maloho ta serednoho biznesu. [Results of research works on the mechanical processing of hemp at small and medium-sized enterprises]. *Engineering sciences: development prospects in countries of Europe at the beginning of the third millennium*. *Vol. 2*. Riga : Izdevnieciba "Baltija Publishing". P. 112-137. Retrieved from http://surl.li/mumue [in Ukrainian].
5. Marynchenko, I.O. et al. (2017). Dovidnyk konopliara [Hemp grower's guide] Sumy, [in Ukrainian].
6. Liniia pererobky lubianykh kultur – vysokoefektyvne obladnannia dlia oderzhannia konoplianoho volokna [The line for the processing of bast crops is a highly efficient equipment for the production of hemp fiber]. Instytut lubianykh kultur: *veb-sait. surl.li*. Retrieved from http://surl.li/muivj [in Ukrainian].

Viktor Sheychenko, Prof., DSc.
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine
Serhii Koropchenko, Senior Researcher, PhD tech. sci.
Institute of Linseed Cultures of the National Academy of Sciences of Ukraine, Glukhiv, Ukraine
Ihor Dudnikov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuliia Skoryak**, post graduate
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Yaroslav Salo, Head of the laboratory
Lviv branch of UkrNDIPVT named after L. Pogorily, village Magheriv, Ukraine

Technical and Technological Solutions for the Intensification of the Processing of Hemp Raw Materials

The technology of processing hemp straw into the same type of straw with a given content of firewood and length has been developed. It was established that increasing the intensity of the actions of the working organs on the processed rind reduces the content of the pith both in the large-stemmed and in the small-stemmed fractions of the stems. The spiciness of the forehead was characterized as follows: for the small-stemmed fraction – 13.8, medium-stemmed – 11.2%, large-stemmed – 10.8%, respectively. The use of the second and third stages of processing ensures the production of lobules with a sharpening of 0.8, 1.7 and 1.9%, respectively.

An experimental universal line for the production of the same type of fiber from hemp tow, hemp straw, long flax tow has been developed with standard quality indicators - the level of fiber and hemp husk no more than 5%.

A line for the processing of bast crops was developed and manufactured. The main advantages of the line include: the possibility of use in small farms, the processing of hemp, hemp of different quality and degree of laying, simplicity of construction, low indicators of metal content and energy consumption, small dimensions, the possibility of processing raw materials both from a roll and from a bale, obtaining fiber or pulp from a low percentage of astringency (does not exceed 5%, and under the conditions of winter preparation trust processing - up to 1%), high productivity (processing up to 1 ton of trust per hour).

technical hemp, technologies of harvesting, technologies of primary processing of hemp, equipment for the production of the same type of fiber

Одержано (Received) 06.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.352 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.93-101

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

Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток

Робота присвячена пошукам шляхів вирішення проблеми підвищення надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток із використанням котків-подрібнювачів, робочі органи яких, виготовлені у вигляді ножових барабанів. Представлений огляд та аналіз існуючих типів машин для подрібнення пожнивних решток, обладнаних приводними та безприводними активними робочими органами, відмічені їх переваги та недоліки. Сформульовані шляхи та способи, на які варто звернути увагу при вирішенні задач підвищення якості подрібнення та надійності протікання даного технологічного процесу. Представлений зміст та методи проведення експериментальних польових досліджень процесу подрібнення пожнивних решток барабаном з ножами, встановленими на його поверхні під певним кутом розхилу між сусідніми рядами та зі зміщенням лінії лез рядів відносно осі самого барабана. Доведено, що при певних значеннях вказаних параметрів можна досягти значного підвищення надійності технологічного процесу, практично позбутися негативного явища забивання міжножового простору частинками рослинних стебел та ґрунтом.

котки-подрібнювачі рослинних решток, надійність технологічного процесу, кути встановлення ножів на поверхні барабана, міжножовий простір, частинки стебел рослин, пожнивні рештки

© В.М. Сало, Д.В. Богатирьов, С.М. Лещенко, 2023

Постановка проблеми. Наявність рослинних решток на поверхні поля після збирання зернової частини врожаю є звичайним явищем. Залежно від їх стану і розмірів ці рештки або заорюють в ґрунт без додаткового подрібнення, одночасно подрібнюють і загортають в ґрунт комбінованими машинами, чи подрібнюють спеціально призначеними для цього машинами, а потім загортають в ґрунт. Зазвичай, при довжині рослинних решток до 20см, їх заорюють звичайними полицевими плугами чи іншими ґрунтообробними агрегатами для безполицевого обробітку ґрунту [1]. Коли розміри рослинних решток дещо більші, то використовують такі ґрунтообробні знаряддя, як дискові борони чи комбіновані ґрунтообробні машини, до складу яких входять робочі органи для попереднього подрібнення стебел[1,2,3,4,5].

Із застосуванням в Україні сучасних технологій збирання зернових культур, при яких на полі залишається вся незернова частина врожаю, виникла необхідність застосування спеціальних машин-подрібнювачів рослинних решток [1,6,7]. До даної групи машин належать так звані мульчувачі, робочі органи яких мають активний привід від валу відбору потужності тракторів, та котки-подрібнювачі рослинних решток з активними ножовими барабанами без приводу. Недоліком першої групи є складність конструкції, висока енергоємність процесу, додаткові навантаження на роздаткові механізми тракторів, а з технологічної точки зору – неможливість подрібнення рослинних решток, які знаходяться на поверхні ґрунту в заглибленнях міжрядь, так як ножімульчувачів обертаються вгоризонтальній площині на певній висоті від поверхні поля.

Котки-подрібнювачі мають значно простішу і надійнішу конструкцію, але характеризуються низькою технологічною надійністю.Так, при певних технологічних параметрах виконання робочого процесу, між плоскими ножами накопичуються частинки подрібнених рослин, а при підвищеній вологості до забивання долучається ще й ґрунтове середовище, як результат – ножовий барабан втрачає працездатність (рис.1). Виходячи з вище викладеного можна припустити, що вирішення даної проблеми дозволить не тільки забезпечити надійність виконання технологічного процесу, а й створить можливість підвищення інтенсивності подрібнення рослинних решток, та покращить умови гумусоутворюючих процесів в ґрунтах, сприятиме підвищенню їх родючості.



Рисунок 1 – Приклад накопичення рослиннихрешток між ножами барабана

Джерело: розроблено авторами

Аналіз основних досліджень і публікацій. За відсутності офіційно затверджених агротехнічних вимог, чи навіть рекомендацій щодо інтенсивності подрібнення рослинних решток, в наукових публікаціях зустрічається інформація по бажаній довжині часток подрібнених стебел, що здебільшого складає 5…12см [8,9]. Особливістю котків-подрібнювачів рослинних решток є те, що задати необхідну довжину подрібнення можна тільки відстанню між лезами ножів, розташованих в сусідніх рядах на поверхні циліндричного барабана. Ножі котків плоскі, практично

завжди радіально розташовані відносно осі барабана під певним кутом один відносно іншого, що сприяє затисканню між ними ґрунтово-рослинної маси під час перерізання стебел рослин. При цьому інтенсивність забивання тим вища, чим менший кут розхилу ножів [10]. В зв'язку з цим, широко розповсюджені марки котків-подрібнювачів стебел соняшнику конструктивно передбачають формування подрібнених часток довжиною понад 20 см. Така довжина рослинних решток не є бажаною. Це є мінімально можлива довжина часток, при якій можливе надійне протікання технологічного процесу без забивання ножових барабанів. Отже, вирішення проблеми забивання може відкрити шлях до підвищення інтенсивності подрібнення.

Поруч з піднятим питанням впливу взаємного розташування ножів на процес подрібнення, не менш важливою є їх мінімально необхідна технологічнамаса, яка формує зусилля на лезо ножа, необхідне для перерізання рослинного матеріалу. Відомі три шляхи вирішення даної задачі. Перший –барабан повинен мати конструкційні параметри при яких одночасно з подрібнюваним матеріалом і ґрунтом контактуватиме якомога менша кількість ножів, в кращому випадку один,з одночасним використанням достатньої власної маси машини [1,10] (рис.2). Втім, навіть за таких умов, відстань між ножами буде значно більша за рекомендовану.

Другий – використання баласту [11]. Даний варіант може бути реалізованим на всіх конструкціях подрібнювачів. В більшості випадків це ускладнення конструкції, та виникає необхідність вирішення задачі рівномірності розподілу дії баласту за шириною захвату машини.

Третій – використання пустотілих ножових барабанів, внутрішній циліндр яких можна, за необхідності, заповнювати водою чи сипучими матеріалами [1]. Але при збільшенні діаметру барабана з метою зменшення відстані між ножами, зменшується і кут розхилу між самими ножами, що, знову ж таки, призводить до забивання і робить виконання технологічного процесу неможливим. Забезпечення необхідних для перерізання стебел зусиль виявляється тісно пов'язаним з розташуванням ножів на барабані.

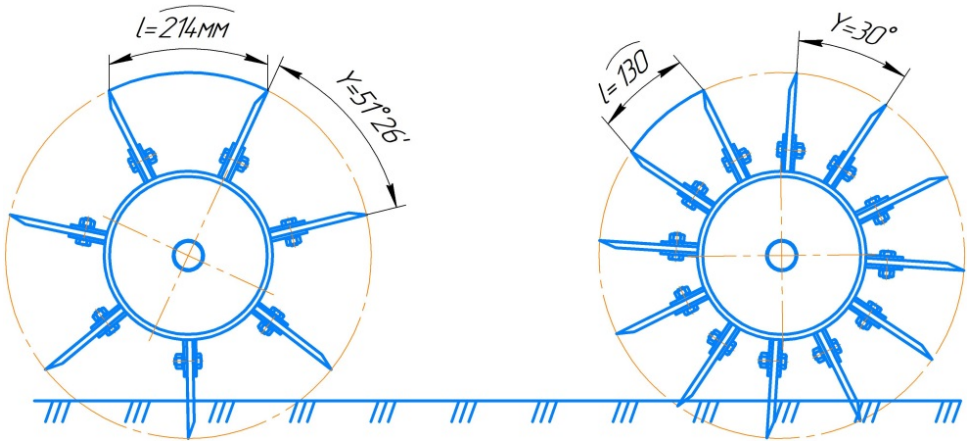


Рисунок 2 – Контакт з поверхнею ґрунту котків з різною кількістю ножів (різними кутами розхилу ножів)

Джерело: розроблено авторами на підставі [1, 10]

Постановка завдання. Метою даної роботи є пошук можливих конструкційних шляхів підвищення надійності функціонування котків-подрібнювачів рослинних решток та експериментальна попередня перевірка однієї з гіпотез, пов'язаної із взаємним розташуванням ножів на поверхні барабана.

Виклад основного матеріалу. Отже, основним недоліком котків-подрібнювачів рослинних решток є забивання міжножового простору ґрунтово-рослинною масою. Спроби та способи усунення даного негативного явища зводяться до наступного:

– обладнання ножових барабанів додатковими конструктивними елементами, здатними примусово очищувати простір між сусідніми ножами від частинок рослин та ґрунту, як наслідок, суттєво ускладнюється конструкція машини [12,13];

– використання ножових барабанів, конструкція яких не передбачає внутрішнього закритого простору, у яких відрізані частинки рослин можуть поступово протискатися між ножами в напрямку осі барабана в умовну порожнину, і в подальшому просипатися на поверхню поля [3,4]. Можна передбачити, що для даного варіанту ефективним може бути, навпаки, зниження кута розхилу між ножами, так як буде знижуватися зусилля, необхідне для протискання рослинних решток між боковинами сусідніх ножів у середину барабана,але це припущення ще потребує підтвердження;

– просторове розташування ножів на поверхні барабана з урахуванням як мінімум двох факторів – це кут між радіально розташованими ножами сусідніх рядів (кут розхилу) та кут зміщення рядів ножів відносно осі барабана (розташування ножів на поверхні барабана по спіралі). Не виключено, що бажаного ефекту вдасться досягти поєднанням деяких з представлених шляхів.

Спостереження за процесом подрібнення свідчить про те, що між ножами затискаються частинки тільки стебел, розташованихвідносно лез перпендикулярно, з відхиленням на незначний кут. Решта частинок стебел після відрізання схильні займати положення, наближене до паралельного відносно площин ножів, при цьому частинкизалишаються на поверхні поля чи легко викидаються з міжножового простору під дією відцентрових сил. В даному випадку важливою є інформація про значення кута зміщення ножів відносно осі барабана, при якому явище забивання стає відсутнім.

В разі підтвердження даної гіпотези відкривається можливість суттєвого зменшення довжини подрібнених часток, що, з агротехнічної точки зору, покращить процес їх розкладання в ґрунті.

Щодо іншого параметру – кута розхилу між сусідніми ножами та його впливу на забивання, то за результатами попередніх польових експериментальних досліджень на базі виробничого зразка подрібнювача гідрофікованого ПГ-6 встановлено, що забивання рослинних решток соняшнику припиняється при мінімальному значенні кута розхилу близькому до 45° при конструкційно можливому мінімальному діаметрі барабана500 мм і довжині частинок подрібнених стебел (однакова відстань між лезами сусідніх ножів) 21,4 см при бажаних значно менших значеннях.

Підтвердити чи спростувати ефективність запропонованих шляхів підвищення якості подрібнення пожнивних решток і надійності даного технологічного процесу достовірно можна лише за результатами експериментальних досліджень, з урахуванням одночасного впливу на процес подрібнення більшості конструкційних та технологічних факторів.

Так, для попередньої перевірки реального впливу просторового розташування ножів на поверхні барабана на надійність виконання технологічного процесу були проведені обмежені польові експериментальні дослідження. За показник надійності технологічного процесу (в подальшому параметр оптимізації *Y*), було прийнято імовірність забивання міжножового простору частинками стебел подрібнюваних рослин (*P%*) Згідно результатів попереднього аналізу та проведених досліджень [10,14], а також з урахуванням поставленої мети, в якості впливових факторів були

обрані конструкційні параметри – кут розхилу між сусідніми ножами α та кут зміщення лінії лез ножів відносно осі барабана γ.

Дослідження проведені за стандартною методикою планування багатофакторного експерименту (табл.1).

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання при проведенні досліджень по встановленню надійності технологічного процесу подрібнювача пожнивних решток

№ п/п	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Верхній (+)	Нижній (-)	
1	Кут розхилу ножів, α ,град	x_1	50	30	15
2	Кут зміщення лінії лез ножів відносно вісі барабана γ, град	x_2	15	3	3

Джерело: розроблене авторами з використанням [15]

Практичною задачею досліджень було виявлення випадків застрягання між ножами певної кількості частинок подрібнених стебел від загальної технічно заданої кількості сформованих частинок. Відсоток частинок, які застрягали між ножами, від загальної кількості утворених частинок, вважався показником імовірності забивання P міжножового простору. На практиці це забезпечували наступним чином. Подрібнювач розташовували, за можливості, на рівній ділянці поля після збирання соняшнику. По ходу подрібнювача розкладали на поверхні поля задану кількість стебел вибраної довжини. Зміну кута зміщення лінії лез відносно осі котка імітували розкладанням стебел соняшнику під певним, передбаченим програмою досліджень, кутом. Подрібнення здійснювали на сприятливих для забивання швидкостях до 3м/с[10]. Після проходження подрібнювача по розкладених в заданому порядку стеблах здійснювали підрахунок загальної кількості частинок стебел і тих, які залишилися затиснутими між ножами, результати заносили до журналу. В стаціонарних умовах визначали їх відсоток для використання при подальшому аналізі досліджуваного процесу.

При проведенні експериментальних досліджень у якості засобу агрегатування використовували трактор МТЗ-130, а функцію експериментального зразка котка-подрібнювача виконувавкоток-подрібнювач батьківських рослин на посівах гібридів кукурудзи, виробництво якого було налагоджене на ПП «Савицький М.І.» (рис.3). Дослідження проводили на полях фермерського господарства «Артеменко» Кіровоградської області.



Рисунок 3 – Загальний вигляд експериментального зразка котка-подрібнювача

Джерело: розроблено авторами

В результаті аналізуекспериментальних даних з використанням стандартної методики[15] в системі прикладних програм STATISTICA 12, отримали рівняння регресії, яке дозволяє оцінити вплив прийнятих факторів на критерій оптимізації:

$$Y(P) = 286,76 - 14,7381 \cdot \alpha - 8,414 \cdot \gamma + 0,1317 \cdot \alpha \cdot \alpha + 0,2513 \cdot \alpha \cdot \gamma + 0,056 \cdot \gamma \cdot \gamma$$

Аналіз отриманого рівняння свідчить, що імовірність забивання міжножового простору частинками рослинних решток суттєво залежить від значень обох кутів, але більшою інтенсивністю характеризується кут розхилу ножів α .

Аналіз графічної інтерпретації експериментальних досліджень у вигляді поверхні відгуку та ліній рівних зрізів (рис. 4), дозволяє відмітити, що зі збільшенням значення обох кутів, імовірність забивання міжножового простору знижується. З урахуванням взаємного впливу обох кутів позбутися даного негативного явища можна при мінімальних значеннях кута розхилу близько $\alpha = 40°$ та кута зміщення лінії лез ножів відносно осі барабана $\gamma = 12°$.

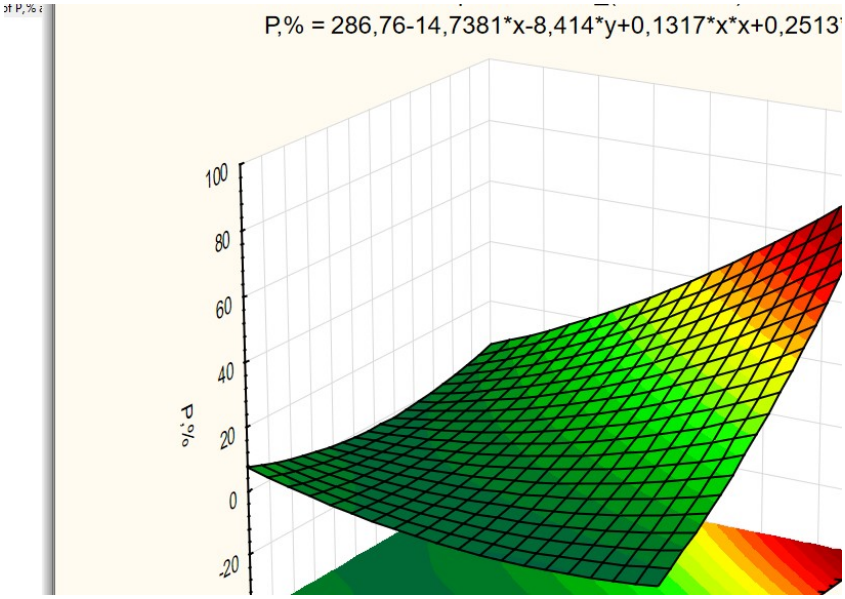


Рисунок 4 – Залежність імовірності забивання міжножового простору частинками подрібнених рослин (*P,* %) від кута розхилу між ножами ($\alpha°$) та кута зміщення лінії лез ножів відносно осі барабана ($\gamma°$)

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Результат проведеної роботи дозволяє зробити припущення, що шлях до забезпечення високої надійності виконання технологічних процесів подрібнення пожнивних решток знаходиться в поєднанні окремих конструкційних особливостей різних запропонованих шляхів вирішення даної проблеми.

Встановлення на барабані рядів ножів, з відхиленням від його осі, дозволяє повністю усунути явище забивання міжножового простору, при значно меншому куту їх розхилу, наближеному до 40º.

Використання в конструкції ножового барабана відхилення лінії лез ножів під кутом понад 12º відносно його осі,дозволить збільшити кількість рядів ножів до дев'яти і забезпечить зменшення довжини частинок подрібнених стебел з 21,4см до 17,4 см, що, певною мірою, покращить як умови загортання рослинних решток в ґрунт, так і умови їх розкладання.

Список літератури

1. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив : навч. посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М. та ін. Х. : Мачулін, 2016. 244с.
2. Борона причіпна БП-6 2-х рядна з ріжучими котками. URL: https://voshod.dp.ua/ua/p1060647819-borona-pritsepnaya-ryadnaya.html (дата звернення: 02.11.2023)
3. Компактна дискова борона KRONOS 4 з ножовими котками. URL: https://www.velesagro.com/products/compact-disc-harrows/221 (дата звернення: 03.10.2023)
4. Лущильник ЛДП-6 (з переднім котком-подрібнювачем). URL: https://sloboda.pro/lushhilnik-ldp (дата звернення: 06.11.2023)
5. Універсальний дискатор, призначений для лущення стерні та передпосівної підготовки ґрунту. URL: https://www.bednar.com/ru/swifterdisc-xo_profi (дата звернення: 17.10.2023)
6. Подрібнювач рослинних залишків DAL-BO Maxicut 600 URL: http://selhospostavka.com.ua/pic/catalog_info-3_520.ipg (дата звернення: 12.10.23)
7. Сало В.М., Богатирьов Д.В., Лещенко С.М., Савицький М.І. Вітчизняне технічне забезпечення сучасних процесів у рослинництві. *Техніка і технології АПК*. 2014. №10. С.16-19.
8. Кукурудзяний метелик – значення, попереджувальні заходи і стратегія боротьби. *Terra HORCH*. 2018. №16. С. 12–14, 28–32. URL: https://www.horsch.com/fileadmin/user_upload/downloads (дата звернення: 18.09.2023)
9. Гайденко О. М. Основні агротехнічні вимоги до обробітку ґрунту та сівби [Електронний ресурс]. *Механізація АПК*. 2020. URL: https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/18415-osnovni-ahrotekhnichni-vymohy-do-obrobitku-gruntu-ta-sivby.html.
10. Сало В.М., Лещенко С.М., Богатирьов Д.В. Вплив параметрів барабана для подрібнення рослинних решток на надійність протікання технологічного процесу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2021. Вип.51. С.70-77 . DOI: 10.32515/2414-3820.2021.51.70-77.
11. Вольський В.А., Коцюбанський Р.В. Розробка структурно-функціональної схеми агрегату для подрібнення та зароблення в грунт грубостебльових рослинних решток . *Механізація та електрифікація сільського господарства: Загальнодерж. зб. ННЦ «ІМЕСГ», смт Глеваха*. 2020. Вип. 12. С.36-43. DOI:10.37204/0131-2189-2020-12-4
12. Барабан подрібнювача рослинних решток з ротором: пат. 153708 Україна. / Сало В.М., Лузан П.Г. Сало Л.В., Лузан О.Р.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. №u 2023 00081; заявл. 09.01.23; опубл. 16.08.2023. Бюл. №33.
13. Коток-подрібнювач рослинних решток: пат. на кор. модель №83199/ Сало В.М., Лузан П.Г, Богатирьов Д.В., Мачок Ю.В., Лузан О.Р.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. №u 2013 03722; заявл.26.03.2013; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 16
14. Дослідження впливу схеми розташування ножів котка-подрібнювача на показники якості подрібнення стебел соняшнику / Шейченко В.О. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин Загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2021. Вип. 51. С.78-88 DOI: 10.32515/2414-3820.2021.51.78-88.
15. Підручник дослідника: навч. посіб. / Васильковський О.М., Лещенко С.М., Васильковська К.В., Петренко Д.І. Х.: Мачулін, 2016. 204с.
16. Influence of equal-area projection of the cylinder drum's cross-section height on the description accuracy of its overcoming the air resistance force / Bohatyrov D.V. et al. *INMATEH - Agricultural Engineering.* 2017. Vol. 52, No. 2, P. 45-56. URL: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195529074 (Last accessed: 14.10.23)
17. Korneski T.S., Prior S.A. Equipment Development to Manage Cover Crops for Small and Urban No-till Farming Systems. *Chemical Engineering Transactions*. July 2017. Vol. 58. P. 181-186.
18. Korniecki T.S., A.J. Price Perfomance of Different Roller Designs in terminating rye cover crop and reducing vibration. *Aplied Eng. Agric – Alabama, USA*. Vol. 22(5). P.633-641.

Referencis

1. Salo, V.M., Leshhenko, S.M., Luzan, P.G., Machok, Yu.V. & Bohatyrov, D.V. (2016). *Mashyny dlia obrobitku gruntu ta vnesennia dobryv. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei [Tillage and fertilizer machines. A textbook for students of agricultural specialties]*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

2. Borona prychipna BP-6 2-kh riadna z rizhuchymy katkamy [Trailed harrow BP-6 2-row with cutting rollers]. *voshod.dp.ua.* Retrieved from https://voshod.dp.ua/ua/p1060647819-borona-pritsepnaya-ryadnaya.html [in Ukrainian].
3. Kompaktna dyskova borona KRONOS 4 z nozhovymy kotkamy [KRONOS 4 compact disk harrow with knife rollers]. *velesagro.com.* Retrieved from https://www.velesagro.com/products/compact-disc-harrows/221 [in Ukrainian].
4. Lushchylnyk LDP-6 (z perednim kotkom-podribniuvachem) [Shredder LDP-6 (with front shredder roller)]. *sloboda.pro.* Retrieved from https://sloboda.pro/lushhilnik-ldp [in Ukrainian].
5. Universalnyi dyskator, pryznachenyi dlia lushchennia sterni ta peredposivnoi pidhotovky gruntu [A universal disker designed for husking stubble and pre-sowing soil preparation]. *bednar.com* Retrieved from https://www.bednar.com/ru/swifterdisc-xo_profi [in Ukrainian].
6. Crimp-roller DAL-BO Maxicut 600. Retrieved from *selhozpostavka.com.ua.* http://selhozpostavka.com.ua/pic/catalog/catalog_info_3_520.jpg.
7. Salo, V.M., Bohatyrov, D.V., Leshchenko, S.M. & Savytskyi, M.I. (2014). Vitchyzniane tekhnichne zabezpechennia suchasnykh protsesiv u roslynnytstvi. [Domestic technical support of modern processes in crop production]. *Tekhnika i tekhnolohii APK – Machinery and technology of AIC*, *10*, 16-19. [in Ukrainian]
8. Kukurudzianyi metelyk – znachennia, poperedzhuvalni zakhody i stratehiia borotby [Corn moth - significance, preventive measures and control strategy]. *horsch.com.* Retrieved from https://www.horsch.com/fileadmin/user_upload/downloads
9. Haidenko, O.M. (2020) Osnovni ahrotekhnichni vymohy do obrobitku gruntu ta sivby [Basic agrotechnical requirements for tillage and sowing]. *Mechanization of the agro-industrial complex*. Retrieved from https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/18415-osnovni-ahrotekhnichni-vymohy-do-obrobitku-gruntu-ta-sivby.html [in Ukrainian].
10. Salo, V.M., Bohatyrov, D.V. & Leshchenko, S.M. (2021). Vplyv parametriv barabana dlia podribnennia roslynnykh reshtok na nadiinist protikannia tekhnolohichnoho protsesu [The Influence of the Parameters of a Chopping Rotor for Plant Residues on the Reliability of the Technological Process]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 51*, 70-77 [in Ukrainian].
11. Volskyi, V.A. & Kotsiubanskyi, R.V. (2020). Rozrobka strukturno-funktsionalnoi skhemy ahrehatu dlia podribnennia ta zaroblennia v hrunt hrubosteblovykh roslynnykh reshtok [Development of the structural and functional scheme of the unit for crushing and embedding coarse-stemmed plant residues into the soil]. *State collection "Mechanization and Electrification of Agriculture" NSC "IMESG"* , *Vol.* 12, 36-43 [in Ukrainian].
12. Patent na korusnu model 153708. *Baraban podribniuvacha roslynnykh reshtok z rotorom* [*crimp-roller*]/ Salo V.M., Luzan P.H. Salo L.V., Luzan O.R.; zaiavnyk i patentotrymach Tsentralnoukrainskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet №2023 00081; zaiavl. 09.01.23; opubl. 16.08.2023, Biul. №33. [in Ukrainian].
13. Patent na korusnu model 83199. *Kotok-podribniuvach roslynnykh reshok* [*crimp-roller*]/ Salo V.M., Luzan P.H. Bohatyrov D.V., Machok Yu.V., Luzan O.R.; zaiavnyk i patentotrymach Salo V.M. – №u2013 03722; zaiavl. 26.03.2013; opubl. 27.08.2013, Biul. №16.1. [in Ukrainian].
14. Sheichenko, V.O., Chernovol, M.I., Volskyi, V.A. & Kotsiubanskyi, R.V. (2021). Doslidzhennia vplyvu skhemy roztashuvannia nozhiv kotka-podribniuvacha na pokaznyky yakosti podribnennia stebel soniashnyku [Research of Influence of the Scheme of an Arrangement of Knives of a Cat-shredder on Indicators of Quality of Crushing of Stalks of Sunflower]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 51,* 78-88 [in Ukrainian].
15. Vasylkovskyi, O.M., Leshchenko, S.M., Vasylkovska, K.V. & Petrenko, D.I. (2016). *Pidruchnyk doslidnyka*. [*Researcher's textbook*]. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
16. Bohatyrov, D.V., Salo, V.M., Kyslun, O.A., Skrynnik, I.O. & Kisilov, R.V. (2017). Influence of equal area projection of the cylinder drum's cross-section height on the description accuracy of its overcoming the air resistance force. *INMATEH - Agricultural Engineering. Vol. 52. No. 2*. P. 45-56 [in English].
17. Korneski, T.S. & Prior, S.A. (2017). Equipment Development to Manage Cover Crops for Small and Urban No-till Farming Systems. *Chemical Engineering Transactions, Vol. 58*, 181-186 [in English].
18. Korniecki, T.S. & Price, A.J. (2017). Perfomance of Different Roller Designs in terminating rye cover crop and reducing vibration. *Aplied Eng. Agric – Alabama*, USA, *Vol. 22(5)*, 633-641 [in English].

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

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Regarding the Reliability of the Technological Process of Shredding Crop Residues

The article is devoted to finding ways to solve the problem of increasing the reliability of the technological process of shredding crop residues using shredding rollers with operating parts in the form of knife drums. The research presents a review and analysis of existing types of machines for shredding crop residues equipped with driven and non-driven active operating parts with their advantages and disadvantages. The ways and methods that should be considered when solving problems of improving the quality of grinding and reliability of this technological process are formulated. The article presents the content and methods of conducting experimental field studies of the process of shredding crop residues by a drum with knives installed on its surface at a certain angle of deflection between adjacent rows and with a shift of the line of row blades relative to the axis of the drum itself. It is proved that at certain values of these parameters, it is possible to achieve a significant increase in the reliability of the technological process, to virtually eliminate the negative phenomenon of clogging of the inter-row space with particles of plant stems and soil.

The rational values of the angles of the knives on the surface of the chopping drum, substantiated in this work, allow increasing the intensity of chopping crop residues as a result of reducing the distance between the rows of knives. Thus, the approximate length of the particles of chopped plant stems can be reduced from 21.4 cm to 17.4 cm, without negative consequences for the reliability of the technological process.

crimp-rollers of plant residues, process reliability, angles of installation of knives on the surface of the drum, inter-groove space, particles of plant stems, crop residues

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.363.2 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.101-111

Р.В. Кісільов, доц., канд. техн. наук, **В.М. Кропівний,** проф., канд. техн. наук, **П.Г. Лузан,** доц., канд. техн. наук, **О.В. Нестеренко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: ruslan_vik@ukr.net

Вдосконалення конструкції бітерів дозатора кормів порційної дії

У статті за рахунок проведеного аналізу роботи дозуючих пристроїв запропонована конструкція бункерного дозатора порційної дії типу БДК-Ф-70-20, який обладнаний круглоланковим ланцюгом та гребінками. Теоретичними дослідженнями було обґрунтовано конструктивні та режимні параметри дозаторів-відокремлювачів обладнаних радіальними пальцями. Визначено їх вплив на якість дозування вологих та грубих компонентів у процесі розвантаження кормів на поперечний горизонтальний транспортер.

тваринництво, дозатор кормів, планетарний механізм, бітер, поперечний транспортер, моноліт корму, ланцюг, гребінка, пальці

Постановка проблеми. Зниження темпів виробництва продуктів тваринництва в Україні пов’язане з багатьма відомими факторами, що неодмінно впливають на позитивний розвиток всієї галузі. Одним з таких чинників є незадовільний стан кормової бази. Недостатня забезпеченість тваринництва кормами, невідповідна їх якість до діючих зоотехнічних вимог при підготовці до згодовування призводить до значного порушення генетичного потенціалу. Тому реалізація тварин в таких умовах можлива лише на 45–50%. Корми та кормові суміші мають визначальний вплив серед

© Р.В. Кісільов, В.М. Кропівний, П.Г. Лузан, О.В. Нестеренко, 2023

економічних показників розвитку галузі тваринництва, так як їх частка в структурі собівартості може складати майже 60–70% всіх витрат [1].

У скотарстві для виробництва молока і м'яса яловичини запроваджені нові деталізовані норми годівлі, а саме їх визначають за 22–24 елементами живлення. Так, у структурі балансу кормів високу питому вагу займають силос, сінаж, сіно, солома, зелені корми, коренеплоди та концентровані корми, що вимагає впровадження прогресивних та інтенсивних технологій з використанням комплексної механізації і автоматизації процесів приготування збалансованої повнораціонної суміші.

В Україні , використовуючи практичний світовий досвід, найбільш поширені змішані типи годівлі великої рогатої худоби (ВРХ): силосний, силосно-сінажний, силосно-коренеплідний, сінажний та багато інших. Характерною рисою їх є багатокомпонентність і різноманітність. Поряд з цим вдосконалюються існуючі системи годівлі ВРХ, які направлені на розробку ефективних та економічно доцільних технологій переробки кормів для приготування вологої і сухої кормової суміші [3, 4].

Вагомою і досить складною операцією в процесі приготування вищевказаних сумішей для ВРХ є дозування і подача різних компонентів згідно встановленої кількості корму з метою отримання якісної кормової суміші. Можливі порушення співвідношення компонентів в суміші призводить до небажаного зниження або підвищення поживності готового корму, що є наявною їх перевитратою.

Узагальнений аналіз застосування механізованих кормоцехів, групи мобільних кормороздавачів та кормопереробних машин на тваринницьких комплексах свідчить, що дозування грубих, соковитих і стебельних кормів не повною мірою задовольняє зоотехнічним і технологічним вимогам. Такі машини та обладнання мають складну конструкцію, досить високі показники металомісткості і енергомісткості, що значно знижує ефективність та якість приготування кормових сумішей. Тому розробка і вдосконалення класичних конструкцій дозаторів кормів для приготування високоефективних кормових сумішей до згодовування і роздавання кормів з обґрунтуванням геометричних та кінематичних параметрів їх робочих органів є актуальним завданням [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі вчені Кукта Г.М., Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ібатуллін І.І., Манько В.М., Хмельовський В.С. та інші займалися дослідженням процесів дозування, змішування кормів та приготування збалансованих повнораціонних сумішей. Вони сформулювали основні положення теорії вищевказаних процесів. Встановлені ними загальні залежності між факторами призвели до певних висновків, що обґрунтовують складність таких процесів, особливо фізико-механічної сторони [6].

Постановка завдання. Метою проведення досліджень передбачалося вивчення закономірностей впливу конструктивних та режимних параметрів на якість дозування грубих, соковитих і стебельних кормів.

Виклад основного матеріалу. В практиці кормоприготування і роздавання кормів широко застосовують масове або об'ємне дозування, кожне з яких може бути порційним або безперервним [7]. В системі використання механізованих кормоцехів, кормороздавачів і кормопереробних машин за кордоном і в Україні найбільш широко застосовують для дозування малосипучих грубих, соковитих і стебельних кормів ланцюгово-планкові бункерні живильники з транспортерними і бітерними дозуючими засобами, що мають різне конструктивне виконання. Тобто вони відрізняються робочими органами подаючих конвеєрів, транспортерів-відокремлювачів і бітерів, їх кількістю і розташуванням, кутом нахилу живильних транспортерів до горизонту, принципом роботи та приймальною частиною [9, 10]. Технологічний процес дозування

малосипучих кормів відбувається із застосуванням одно- та двоступеневої системи подачі (рис. 1).

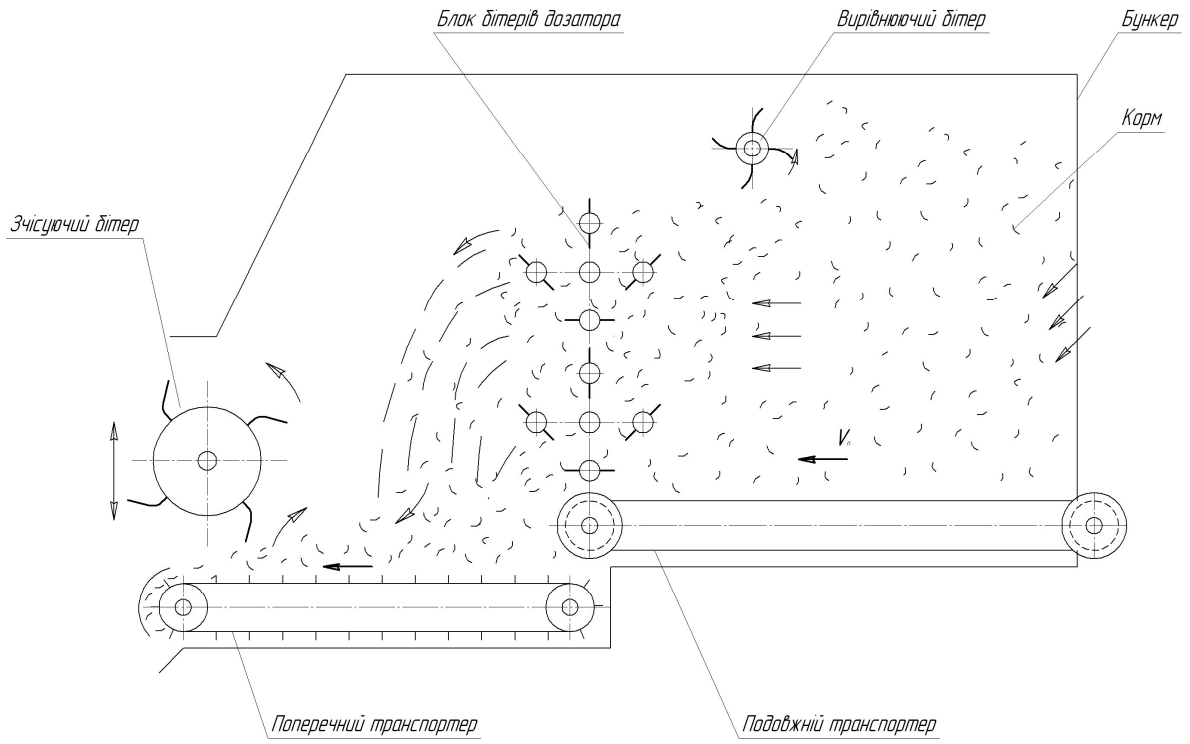


Рисунок 1– Функціональна схема двохстадійного дозатора стебельних кормів зі змінним кутом входження пальців граблин в моноліт корму

Джерело: розроблено авторами

Моноліт кормової сировини в бункері подається ланцюгово-планковим конвеєром до відокремлюючих пристроїв, що складаються з бітерів. Пальці граблин бітерів зчісують і розрихлюють матеріал моноліту корму, який стикається з ними, і вивантажують на поперечний конвеєр або подають безпосередньо в технологічну лінію на збірний транспортер для подальшого змішування компонентів (одноступенева система дозування кормів).

Пропускна здатність бітерної системи повинна перевищувати пропускну здатність живильника, який забезпечує подачу кормів до блока бітерів і узгоджуватись з нею. Приведена система може забезпечувати регульовану віддозовану видачу в'язких кормових матеріалів з допустимими відхиленнями. Для підвищення точності дозування в'язких стебельних та інших кормових матеріалів і забезпечення працездатності бітерного пристрою в допустимих межах застосовується двоступінчаста система дозування. Вона складається з живильника, дозатора-відокремлювача бітерного типа, вирівнюючого зчісуючого пристрою, поперечного конвеєра, що забезпечує згладжування нерівномірності кормового потоку, який надходить з живильника, і автоматично керує його роботою.

Для аналізу конструктивних і кінематичних параметрів бітерів пропонується розроблена фізична модель, яка визначає взаємодію радіальних пальців бітера з монолітом корму (рис. 2).

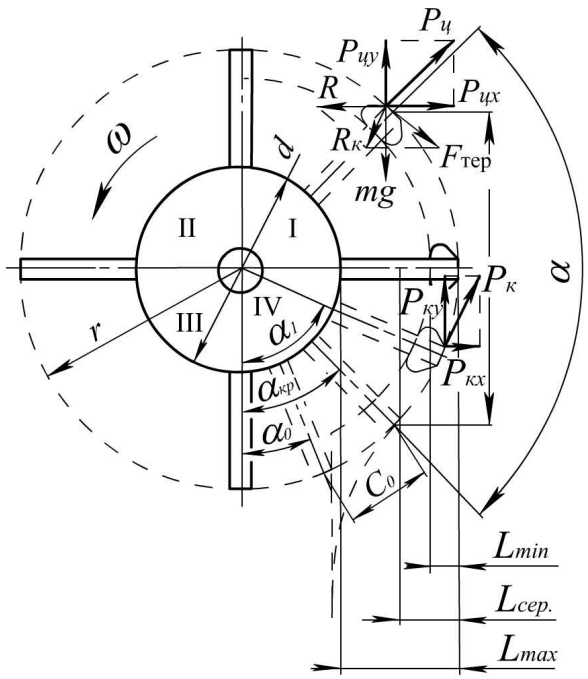


Рисунок 2 – Схема сил взаємодії радіального пальця бітерного дозатора з часткою корму
Джерело: розроблено авторами

Проведений аналіз запропонованої кінематики процесу відокремлення корму і взаємодії радіальних пальців з монолітом за один цикл дозволив виділити чотири періоди: пружне стискання і початок руйнування структури моноліту корму, що визначається кутом α_0 – стикання пальця з монолітом – і кутом $\alpha_{ёд.}$ – обертання пальця до початку руйнування структури моноліту; руйнування структури моноліту, відокремлення матеріалу від моноліту корму пальцем і формування на кінці штифта тіла волочіння, що обмежується кутом α_1 – формування тіла волочіння корму; рух тіла волочіння в контакті з пружним середовищем, відокремлення додаткової порції кормової маси, вільне переміщення матеріалу вдовж пальця, що відбувається до початку четвертого періоду, який обмежується кутом $\alpha_2 = \pi$; період розвантаження граблин бітера, що відбувається в квадранті $\alpha_3 > \pi$ розвантаження бітера.

Таким чином, бітер, що є ротаційним робочим органом, за допомогою пальців захвачує і розрихлює певний шар маси моноліту, долає пружне стискання матеріалу, руйнує структуру його, відокремлює частину корму від моноліту і перекидає відцентровою силою на вивантажувальний конвеєр. В процесі руху пальця гребінки на кінці його формується тіло волочіння, яке рухається вздовж пружної кормової маси. При цьому гребінка бітера відбирає з маси корму шар, який дорівнює висоті хорди m, центрального кута α між радіусами входження гребінки в масу та виходу її з маси. Нелінійна траєкторія руху пальця в першому і другому періодах не враховується, оскільки в кожний момент реакція матеріалу направлена по нормалі до пальця. Ділянка траєкторії пальця, на якій відбувається пружній стиск, може бути визначено наступним рівнянням:

$$C_0 = \pi \cdot r \frac{\alpha_{кр} - \alpha_o}{180}, \quad (1)$$

де r – радіус бітера, м;

$\alpha_{кр.}$ – кут відхилення пальця, при якому починається руйнація матеріалу, град.;

α_0 – кут, при якому палець починає контактувати з матеріалом, град.

Мінімальні затрати енергії в цьому випадку виникають тоді, коли з масою відбувається контакт тільки однієї гребінки.

Тоді:

$$\alpha = 2\arcsin\frac{m}{D}, \tag{2}$$

а оптимальна кількість гребінок бітера складає:

$$Z = \frac{360^0}{\alpha} = \frac{180}{\arcsin\frac{m}{D}}, \tag{3}$$

За час обертання граблини від 0 до π об'єм корму, що видаляється бітером, визначається за формулою:

$$V = \frac{\pi \cdot r \cdot \vartheta_n}{\omega} \cdot B, \tag{4}$$

де ω – кутова швидкість руху бітера;

r – радіус бітера;

ϑ_n – швидкість руху поздовжнього транспортера;

B – довжина граблини (ширина бункера).

Відокремлюваний корм розташовується на робочій поверхні пальців, що дозволяє зробити висновки, а саме: для узгодження принципу роботи бітера в процесі відокремлення корму необхідно, щоб робоча довжина його пальців мала змінну величину відносно пропорційної площі поперечного перерізу відокремлюваного корму (від 0 на початку взаємодії з кормом до максимальної величини в кінці процесу відокремлення корму від загального моноліту корму). Таким чином, площа поперечного перерізу шару, що видаляється граблиною, буде мати вигляд:

$$S = \int_0^{\pi} \frac{\pi \cdot \vartheta_n}{2\omega} \cdot r \cdot \sin \omega t \cdot dt, \tag{5}$$

ωt – кут обертання граблини;

t – час обертання граблини.

Продуктивність чотирьохграбельного бітера за один оберт в залежності від подачі кормової маси можна визначити співвідношенням:

$$Q = \frac{4\pi \cdot r}{\omega} \cdot \vartheta_n \cdot B \cdot \gamma, \tag{6}$$

або

$$Q = \frac{4\pi \cdot r^2 \vartheta_n \cdot B \cdot \gamma}{\vartheta_б} = \frac{2 \cdot r \cdot \vartheta_n \cdot B \cdot \gamma}{n}, \tag{7}$$

де γ – об'ємна маса корму;

n – частота обертання вала бітера;

$\vartheta_б$ – кругова швидкість руху бітера;

ϑ_n – швидкість руху конвеєра.

Таким чином, секундна продуктивність бітерного відокремлювача визначається в залежності від діаметра бітера і величини подачі кормової маси за допомогою формули:

$$q = \frac{4\pi \cdot r \cdot \vartheta_n \cdot B \cdot n \cdot \gamma}{\omega}, \quad (8)$$

Виходячи з оптимальних умов розподілення корму на гребінці бітера, формула оптимальної секундної продуктивності приймає вигляд:

$$q = l^2 \cdot n \cdot \sin 2\varphi'' \cdot B \cdot \gamma, \quad (9)$$

де φ" – кут внутрішнього тертя (для розрихленої стебельної маси φ"=50…55^0);

l – довжина пальця.

Прирівнюючи продуктивність бітера до оптимальної продуктивності конвеєра, отримуємо рівняння кінематичного зв'язку поздовжнього транспортера і бітерного пристрою:

$$\vartheta_n = \frac{l^2 \cdot n \cdot \sin 2\varphi'' \cdot \gamma}{r}, \quad (10)$$

Робочу довжину пальця граблини визначаємо з рівняння подачі моноліту за один оберт відокремлюючого бітера:

$$\Delta x = \frac{2\pi \cdot r \cdot K_1 K_2}{\lambda \cdot Z}, \quad (11)$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує ковзання моноліту на подавальному транспортері;

K_2 – коефіцієнт спучення корму при відокремленні;

λ – співвідношення швидкостей руху бітера-відокремлювача і подавального транспортера;

Z – кількість граблин бітера.

З розглянутої схеми дії сил бітерного дозатора (рис. 2) видно, що відокремлення порції корму від моноліту відбувається під дією кругового зусилля пальців $P_к$, складовими якого є горизонтальна $P_{кх}$ і вертикальна $P_{ку}$ сили. Горизонтальна складова в 1-му квадранті направлена по ходу бурта корму і, стискаючи його, відокремлює від нього частки, що стикуються з пальцем, а потім перекидає їх на вивантажувальний транспортер. В 4-му квадранті ця складова направлена проти поступальної швидкості подавального транспортера і не відокремлює частки корму від моноліту, а навпаки, втискає їх в граничну зону, гальмуючи переміщення корму в бункері. Втиснуті частки протягуються пальцями бітерів в кормовому моноліті, при цьому витрачається додаткова (безкорисна) робота, яка не пов'язана з процесом відокремлення і дозування корму, збільшуючи енергоємність процесу.

Для зменшення витрат енергії для періоду руху пальців C_o запропонована нова звужена конструкція пальця з трикутним або ромбовидним його перерізом.

При використанні бітерів-відокремлювачів з похилим або ортогональним розташуванням пальців (рис. 3) зменшується площа контакту їх з кормом, що впливає на зменшення ступеня дії деформацій корму. Такий кут установки пальця називають критичним. Він забезпечує кращу стабільність відокремлення корму. Враховуючи, що матеріал пальців – сталь, приймаємо кут тертя для силосу і сінажу φ=27^0, а для соломи φ=17^0, тоді критичний кут нахилу пальців приймаємо $\alpha_{кр}$=60–73^0, що забезпечить ефективну взаємодію пальця ромбовидного перерізу з монолітом і зменшить витрати енергії та коефіцієнт нерівномірності подачі корму.

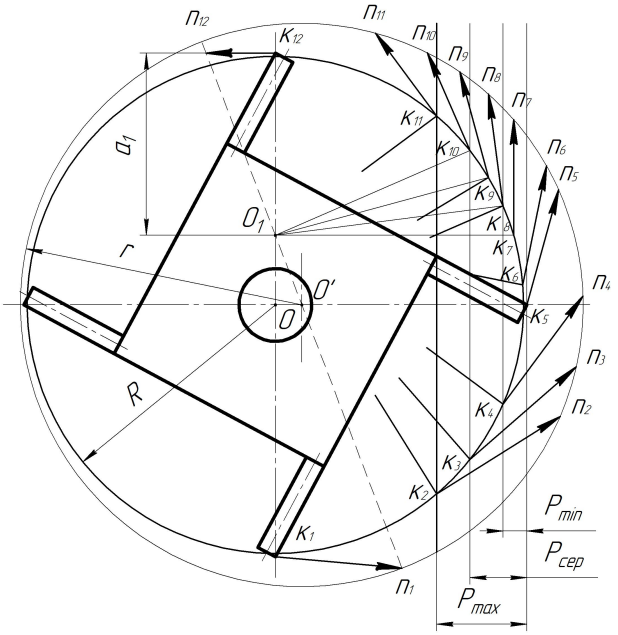


Рисунок 3 – Схема взаємодії бітера першого ступеня дозування з похилими пальцями з монолітом

Джерело: розроблено авторами

При проектуванні конструкції бітерного дозатора з перемінним кутом входження пальця в моноліт корму, було з'ясовано, що при повороті бітера на кут π палець в переносному русі повинен бути розташований під кутом $\pi/2$, що свідчить про відповідність вимогам технологічного процесу вивантажування корму.

З математичного аналізу плоских еліптичних кривих вищого порядку такому руху відповідають криві завитку Паскаля. В окремому випадку завитка Паскаля можна отримати за принципом побудови епіциклоїди шляхом обкатування колеса по нерухомому колу з однаковим діаметром. Використовуючи принцип складання двох обертальних рухів і кінематику руху пальця активного бітера, визначимо основні параметри складного руху, на основі яких синтезується механізм бітера. Параметричні рівняння руху точки в прямокутних координатах X і Y для епіциклоїди запишемо у вигляді:

$$X = r \cdot \left[K \cdot \cos(j \cdot \omega t) + \cos(j+1) \cdot \omega t)\right], \quad (12)$$

$$Y = r \cdot \left[K \cdot \sin(j \cdot \omega t) + \sin(j+1) \cdot \omega t)\right], \quad (13)$$

Аналіз рівнянь показує, що вони справедливі тільки при одночасній зміні параметрів бітерів і швидкості руху транспортера, що не передбачено конструкцією існуючих живильників подрібнених стебельних кормів.

Розглянутим умовам роботи відповідає бітерний кормовідокремлювач з перемінним кутом установки пальців і траєкторією їх руху по завитку Паскаля, який називають активним бітером.

Положення пальців такого бітера визначається напрямками радіусів-векторів, які проведені з миттєвого центра обертання O_1 (рис. 4). Дія пальця активного бітера на кормовий моноліт відбувається при мінімальній подачі – по дузі $К_4К_8$, при максимальній – по дузі $К_2К_{10}$. Довжина дуги безпосередньо відокремлення кормової маси у цьому випадку значно більше дуги взаємодії з масою серійного бітера з постійним кутом установки пальця. Це значно збільшує пропускну здатність активного

бітера і призводить до більш точного узгодження об'ємів подачі транспортером і відокремлення корму бітерами, що помітно підвищує рівномірність видачі корму.

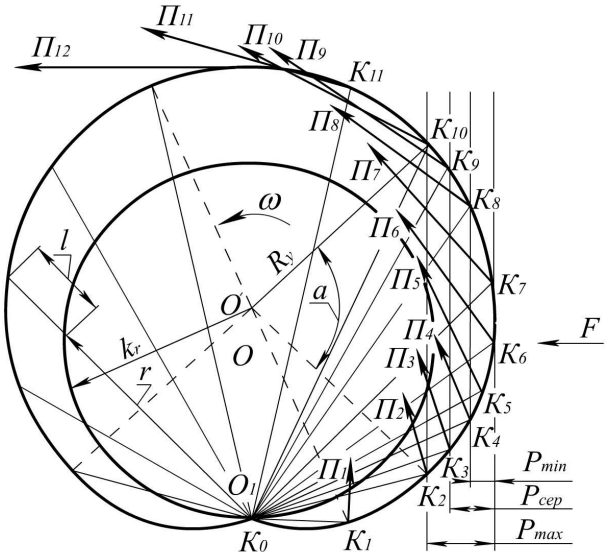


Рисунок 4 – Схема взаємодії пальців бітера з кормовим монолітом

Джерело: розроблено авторами

Площа поперечного перерізу шару корму, яка видаляється пальцем бітера представляє собою площу параболічного сегмента і визначається за формулою:

$$F_n = \frac{2}{3} P \cdot q, \tag{14}$$

де q – довжина ділянки дії пальця на корм;

P – висота параболічного сегмента, яка дорівнює величині подачі поздовжнього транспортера.

Якщо замінити параболічний сегмент круговим, довжина ділянки дії пальця q буде дорівнювати хорді умовного круга з кормового моноліту, довжину якої визначаємо за формулою:

$$q = 2 \cdot R_y \cdot \sin\frac{\alpha}{2}, \tag{15}$$

де R_y – радіус умовного круга, що описаний кінцями пальців бітера;

α – центральний кут дуги дії пальця на моноліт корму.

Підставивши значення q у рівняння (14), прирівнюємо його площі кругового сегмента:

$$F_n = \frac{R_y^2}{2}\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180} - \sin\alpha\right), \tag{16}$$

Вирішуючи рівняння відносно висоти сегмента P, яка за одиницю часу представляє собою швидкість руху подавального транспортера, отримаємо рівняння кінематичного зв'язку подавального транспортера і активного бітера:

$$P = \frac{3}{8} \cdot \frac{R_y\left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha\right)}{\sin\frac{\alpha}{2}}, \tag{17}$$

Висновки. Проведені теоретичні дослідження дозволили розробити модель процесу відокремлення моноліту корму робочими органами дозуючих бітерів, яка встановлює пропускну здатність, витрати енергії і траєкторію руху пальців бітерів з радіальними і похилими пальцями з постійним і змінним кутом входження в моноліт.

Доведено, що довжина дуги траєкторії взаємодії бітера зі змінним кутом установки пальців значно більша довжині дуги взаємодії з масою корму серійного бітера з постійним кутом установки пальців. Пропускна здатність активного бітера збільшується, що призводить до більш повної відповідності об'єму подачі поздовжнім транспортером і бітером-відокремлювачем зі змінним кутом установки пальців, внаслідок чого і підвищується рівномірність подачі дозатора [11, 12].

Аналізом кінематики руху пальців активного бітера встановлено, що вертикальна сила пружного стискання маси корму при проникненні пальців зводиться до мінімальної величини і таким чином зменшує витрати енергії на привід відокремлювального бітера на 30–35% у порівнянні з радіальними пальцями.

Список літератури

1. Ревенко І.І., Хмельовський В.С., Заболотько О.О. Машини і обладнання для тваринництва : Електронний підручник. Київ : ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти», 2019. URL: http://rodak.if.ua/mot/index.htm (дата звернення: 06.10.2023).
2. Лазаревич А. П. Однотипові кормосуміші для молочної худоби. *Тваринництво України*. 2007. № 4. С. 33–35.
3. Adgidzi, D.A., Mu'azu, S.T., Olorunsogo and E.L. Shiawoya (2006). Design considerations ofmixer-pelleting machine for processing animal feeds. *7th annual engineering conference, School of Engineering and Engineering Technology*, FUT Minna. 28–30 June 2006. URL: http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf (дата звернення: 06.10.2023).
4. Хмельовський В.С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції.* Київ : НУБІП України, 2017. С. 77–78. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77 (дата звернення: 09.10.2023).
5. Ібатуллін І.І., Мельник Ю.Ф., Отченашко В.В. Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: навчальний посібник під ред. академіка НААН України І.І. Ібатулліна. К.: 2015. 422с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u104/Ібатулін.pdf (дата звернення: 09.10.2023).
6. Ревенко И., Ревенко Ю. Качество приготовления и эффективность использования концентрированных и комбинированных кормов. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow. 2013. Вип. 3. С. 356–361. URL: http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf (дата звернення: 12.10.2023).
7. Науменко О.А., Бойко І.Г., Грідасов В.І., Дзюба А.І. Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва. За ред. Скорика О.П., Полупанова В.М. Харків, ХНТУСГ, 2009. 429 с. URL: https://b.eruditor.link/file/2418505/ (дата звернення: 11.10.2023).
8. Шевченко І.А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоюваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб*., 2013. Вип. 43. С. 179–185. URL: http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701 (дата звернення: 12.10.2023).
9. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. Машини та обладнання для тваринництва. Київ: *Кондор*, 2009. 730 с. URL: http://www.twirpx.com/file/2085032/
10. Шацький В.В., Мілько Д.А., Болтянський Б.В.,. Коломієць С.М., Семенцов В.І. Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. *Збірник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь. 2013. Вип. 1; Т. 3. С. 43–50. URL: http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11SVVIAP.pdf
11. Шацкий В.В. Математическое моделирование динамичности плотности и качества кормовой смеси для животных. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2012. Вип.2. Т.2. С. 3–19. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdtusg_2014_144_32.pdf (дата звернення: 12.10.2023).

12. Шабельник Б.П. Теорія та розрахунок машин для тваринництва : монографія. Харків : ХДТУСГ, 2002. 216 с.

References

1. Revenko, I.I., Khmel'ovs'kyj, V.S. & Zabolotko, O.O. (2019). *Mashyny i obladnannia dlia tvarynnytstva* [*Machines and equipment for animal husbandry*] : Elektronniy pidruchnyk. Kyiv: DU «Naukovo-metodychnyj tsentr vyschoij ta fahovoij osvity». Retrieved from http://rodak.if.ua/mot/index.htm. [in Ukrainian].
2. Lazarevych, A. P. (2007). Odnotypovi kormosumishi dlia molochnoi khudoby [Preparation of feed mixtures by the combined blender]. *Tvarynnytstvo Ukrainy – Bulletin of Agricultural Science, 4,* 33–35 [in Ukrainian].
3. Adgidzi, D.A., Mu'azu, S.T., Olorunsogo & Shiawoya, E.L. (2006). Design considerations ofmixer-pelleting machine for processing animal feeds. *7th annual engineering conference, School of Engineering and Engineering Technology, FUT Minna. 28–30 June 2006*. Retrieved from http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf [in English].
4. Khmel'ovs'kyj, V.S. (2017). Otsinka rivnomirnosti zmishuvannia kormiv [Evaluation of uniformity of feed mixing]. *XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia (Kyiv) – XII International Scientific and Practical Conference (Pp.* 77–78*), Kyiv NUBIP Ukrainy*. Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77 [in Ukrainian].
5. Ibatullin, I.I., Melnuk, U.F. & Otchenashko, V.V. (2015). *Praktykum z godivli silskogospodarskyh tvaryn* [*Workshop on feeding agricultural animals*]. I.I. Ibatullina (Eds.). Kyiv. Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u104/Ібатулін.pdf [in Ukrainian].
6. Revenko, I. & Revenko, Ju. (2013). Kachestvo prigotovlenija i jeffektivnost' ispol'zovanija koncentrirovannyh i kombinirovannyh kormov [Quality of preparation and efficiency of use of concentrated and combined fodder]. *MOTROL. Lublin-Rzeszow. Vol. 3*, 356–361. Retrieved from http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf [in Russian].
7. Naumenko, O.A., Boyko, I.G., Gridasov, V.I. & Dzuba, A.I. (2009). *Proektuvannya tehnologij i tehnichnyh zasobiv dlya tvarynnytstva* [*Designing technologies and technical means for animal husbandry*]. Skoryka O.P., Polupanova V.M. (Eds.). Harkiv : HNTUSG Retrieved from https://b.eruditor.link/file/2418505/ [in Ukrainian].
8. Shevchenko, I.A., Pavlichenko, V. M., Lykhodid, V. V. & Zabudchenko, V. M. (2013). Analiz konstruktsij tekhnichnykh zasobiv dlia vyrobnytstva volohykh vysokozasvoiuvanykh kormiv [Analysis of constructions of technical means for the production of wet highly digestible fodde]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 43,* 179–185. Retrieved from http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701 [in Ukrainian].
9. Revenko, I.I., Brahinets', M.V. & Rebenko, V.I. (2009). *Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnytstva* [*Machinery and equipment for animal husbandry*]. Kyiv : Kondor. Retrieved from http://www.twirpx.com/file/2085032/ [in Ukrainian].
10. Shats'kyj, V.V., Mil'ko, D.A., Boltians'kyj, B.V.,. Kolomiiets', S.M. & Sementsov, V.I. (2013). Yakist' zmishuvannia komponentiv ratsionu – osnova pidvyschennia produktyvnosti tvaryn [The quality of mixing the components of the diet is the basis of increasing the productivity of animals]. *Zbirnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific bulletin of Tavriyya State Agro-Technological University, Vol. 1,* 3, 43–50. Retrieved from http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11SVVIAP.pdf [in Ukrainian].
11. Shackij, V.V. (2012). Matematicheskoe modelirovanie dinamichnosti plotnosti i kachestva kormovoj smesi dlja zhivotnyh [Mathematical modeling of the dynamism of density and quality of fodder mixture for animals]. *Naukovij visnik Tavrijs'kogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universitetu – Scientific bulletin of Tavriyya State Agro-Technological University, Vol. 2, 2*, 3–19. Retrieved from http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN &IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdtusg_2014_144_32.pdf [in Russian].
12. Shabel'nyk, B.P. (2002). *Teoriia ta rozrakhunok mashyn dlia tvarynnytstva* [*Theory and calculation of machines for animal husbandry*]. Kharkiv : KhDTUSH [in Ukrainian].

Ruslan Kisilov, Assoc. Prof., PhD tech. sci**., Volodymyr Kropivny,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Petro Luzan,** Assoc. Prof., PhD tech. sci**., Olexsander Nesterenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Design Improvement of Beaters Portioned Feed Dispenser

In the article, based on the analysis of the operation of dosing devices, the construction of a portioned hopper doser of the BDK-F-70-20 type, which is equipped with a circular chain and combs, is proposed. The design and operating parameters of dispenser-separators equipped with radial fingers were substantiated by theoretical studies. Their influence on the quality of dosing of wet and coarse components in the process of unloading feed onto a transverse horizontal conveyor was determined.

The technological process of dosed supply of crushed stem, juicy and other viscous fodder is carried out using a one- and two-stage system. The monolith of feed raw material in the bunker is fed by a chain-slat conveyor to the separating devices, which consist of beaters. The rake fingers of the beaters comb and loosen the material of the feed monolith that comes into contact with them and is discharged onto a cross conveyor or fed directly into the processing line to the assembly conveyor and mixing of components (one-stage feed dosing system).

The capacity of the beater system must exceed the capacity of the feeder, which provides feed to the block of beaters, and be consistent with it. The given system can provide adjustable, metered delivery of viscous feed materials with acceptable deviations. To increase the accuracy of dosing of viscous stem and other feed materials and to ensure the performance of the beater device within the permissible technological tolerance, a two-stage dosing system is used, which consists of a feeder, a beater-type dispenser-separator and an equalizing combing device of the cross conveyor, which ensures the smoothing of the unevenness of the feed flow , which comes from the feeder, and automatically controls its operation.

The uniformity of feed output depends on the beater, the design and kinematic parameters of which affect the amount of feed captured by each comb and the formation of the mass discharge roll on the assembly or discharge conveyor. Until now, the optimal parameters of the pin beaters that separate leaf-stemmed fodder have not been clarified, which leads to significant unevenness in the operation of serial feeders-dispensers. All existing dispensers do not meet the established zootechnical requirements for dosing leaf-stem materials.

For the analysis of the constructive and kinematic parameters of the beaters, a developed physical model is proposed, which determines the interaction of the radial fingers of the beater with the feed monolith.

The analysis of the proposed kinetics of the feed separation process and the interaction of the radial fingers with the monolith in one cycle made it possible to distinguish four periods: elastic compression and the beginning of the destruction of the feed monolith structure, which is determined by the angle α0 of contact of the finger with the monolith and the angle αkr of the rotation of the finger before the beginning of the destruction of the monolith structure; destruction of the structure of the monolith, separation of the material from the stern monolith with a finger and the formation of a drag body at the end of the pin, which is limited by the angle α1 of the formation of the stern drag body; the movement of the drawing body in contact with the elastic environment, separation of an additional portion of feed mass, free movement of material along the finger, which occurs before the beginning of the fourth period, which is limited by the angle $\alpha_2=\pi$; the period of discharge of the beater rakes, which occurs in the quadrant $\alpha_3>\pi$ of the discharge of the beater.

Thus, the beater, which is a rotary working body, grabs and loosens a certain layer of the mass of the monolith with the help of its fingers, overcomes the elastic compression of the material, destroys its structure, separates part of the feed from the monolith and throws it onto the unloading conveyor by centrifugal force. During the movement of the finger of the comb, a dragging body is formed at its end, which moves along the elastic feed mass.

It is proved that the length of the arc of the trajectory of interaction of the beater with a variable angle of installation of the fingers is significantly greater than the length of the arc of interaction with the mass of the feed of a serial beater with a constant angle of installation of the fingers. The throughput capacity of the active beater increases, which leads to a more complete correspondence of the volume of supply by the longitudinal conveyor and the beater-separator with a variable angle of installation of the fingers, as a result of which the uniformity of the supply of the dispenser increases.

The analysis of the kinematics of the movement of the fingers of the active beater established that the vertical force of elastic compression of the feed mass during the penetration of the fingers is reduced to a minimum value and thus reduces the energy consumption for the drive of the separating beater by 30–35% in comparison with radial fingers.

animal husbandry, feed dispenser, planetary mechanism, beater, transverse conveyor, feed monolith, chain, comb, fingers

Одержано (Received) 14.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК631.363 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.112-121

В. Ю. Дудін, доц., канд. техн. наук, **В.Б. Говоруха,** проф., д-р фіз.-мат. наук
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua

Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів

Метою роботи було обґрунтування режимних параметрів роботи стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів на основі експериментальних досліджень процесу.В результаті лабораторних досліджень процесу змішування сипких кормів експериментальним змішувачем встановлено наступне. Зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при n = 48 хв$^{-1}$ та t = 3,2 хв. після чого спостерігається незначне зменшення. Характер процесу близький до типової кінетики змішування сипких матеріалів. Витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання 40,5 хв$^{-1}$, а не в мінімумі n. При мінімумі k витрати енергії на процес складають 2,25 кВт/цикл а при максимумі – 3,66 кВт/цикл. Час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах 2,9–3,56 хв. На основі отриманих даних встановлено раціональні параметри розроблюваного змішувача.

корми, змішування, сипкі компоненти,експеримент, параметри, якість змішування, енергоємність, частота обертання, тривалість процесу

Постановка проблеми. Відомо, що якість кормів має значний вплив на продуктивність сільськогосподарських тварин, і цей вплив становить приблизно 50–60 %[1]. У випадку свиней і птиці в Україні домінує сухий тип годівлі з використанням концентрованих кормів. Зауважимо, що більше 80 % птиці отримують повнораціонні комбікорми [2]. У галузі свинарства цей показник суттєво нижчий і становить близько 20–22 %[3]. Це можна пояснити тим фактом, що приблизно 60% всього поголів'я свиней в Україні зосереджено в господарствах населення та на невеликих фермах (з менш ніж 1000 голів), де годівлю тварин переважно проводять за допомогою концентрованих кормів у чистому вигляді, без приготування кормових сумішей. Однією з головних причин цієї ситуації є відсутність якісного обладнання для приготування кормових сумішей, зокрема, сипких кормів [4]. Ці змішувачі повинні бути надійними, легкими у використанні і забезпечувати необхідну якість у процесі приготування комбікормів, зокрема, високу однорідність процесу змішування [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Приготування кормових сумішей здійснюється в основному змішувачами різноманітної конструкції[6, 7]. Широке поширення отримали горизонтальні змішувачі з робочим органом у вигляді спіралі-стрічки, встановленої на валу, що обертається. Їх відрізняє здатність за досить короткий час роботи досягати необхідної рівномірності суміші [8, 9]. Тому вдосконалення конструкції стрічково-гвинтового змішувача є актуальним завданням. Основним призначенням пропонованогозмішувача є приготування сухих сумішей із сипких кормових компонентів.

© В.Ю. Дудін, В.Б. Говоруха, 2023

Використовуючи результати попередніх експериментальних досліджень [10, 11] проведемо визначення основних конструкційно технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів.

З аналізу потреби в таких машинах [12] визначено, що необхідний об'єм бункера змішувача повинен бути в межах 0,4–0,45 м^3. Теоретично встановлено, що в заданому об'ємі корму рівномірність змішування компонентів буде максимальною при зовнішньому діаметрі гвинта (0,76–0,84 м) та її ширині – 0,05 м. При цьому кут нахилу стрічки за умови найменшого опору при її обертанні повинен бути в межах 50–80°. Інтерпретуючи ці дані за умови одного повного витка гвинта отримаємо довжину бункера – 1,5 м.

Постановка завдання. Метою роботи було обґрунтування режимних параметрів роботи стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів на основі експериментальних досліджень процесу.

Виклад основного матеріалу. Компонувальну схему розробленого змішувача приведено на рис. 1.

Було створено зменшену модель спірально-стрічкового змішувача з об'ємом бункера 0,4 м^3 у масштабі 1:4, як показано на рисунку 1. Привід вала змішувача здійснювався від електродвигуна постійного струму через черв'ячний редуктор, а живлення та регулювання обертів двигуна контролювалися за допомогою регульованого блока живлення.

У якості варіабельних факторів було вибрано наступні параметри: частота обертання n робочого органу змішувача (діапазон від 35 до 55 хв.$^{-1}$), час змішування t (від 1 до 5 хв.) та вміст мінімального компоненту суміші g (від 5% до 15%). Дослідження проводилися з використанням методу математичного планування багатофакторного експерименту.

Для визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів змішувача на ефективність процесу використовувалася математична теорія планування експерименту, яка дозволяє побудувати математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії другого порядку (поліномів).

Оптимізація проводилася з використанням таких критеріїв, як питома енергоємність процесу змішування q (Вт·год/кг) та вміст однорідності суміші μ (%)

$$q = \frac{N}{Q}, \tag{1}$$

де N – потужність на привод змішувача, Вт;Q–продуктивність змішувача, кг/год.

Продуктивність змішувача Q визначали виходячи з часу, затрачуваного на приготування однієї наважки, яка складала 2,750 кг.

$$Q = \frac{M}{t}, \tag{2}$$

де M – вага отриманого продукту, кг;t – час продуктивної роботи змішувача, год.

Частоту обертання валу змішувача змінювали шляхом зміни подачі струму при відповідній напрузі.Потужність приводу визначали виходячи з сили струму I та напруги U, яка подавалась на двигун:

$$N = 0,9 \cdot I \cdot U, \tag{3}$$

де I – сила струму на приводі змішувача A;U – напруга приводу, В.

Значення однорідності змішуванняμ розраховували наступним чином

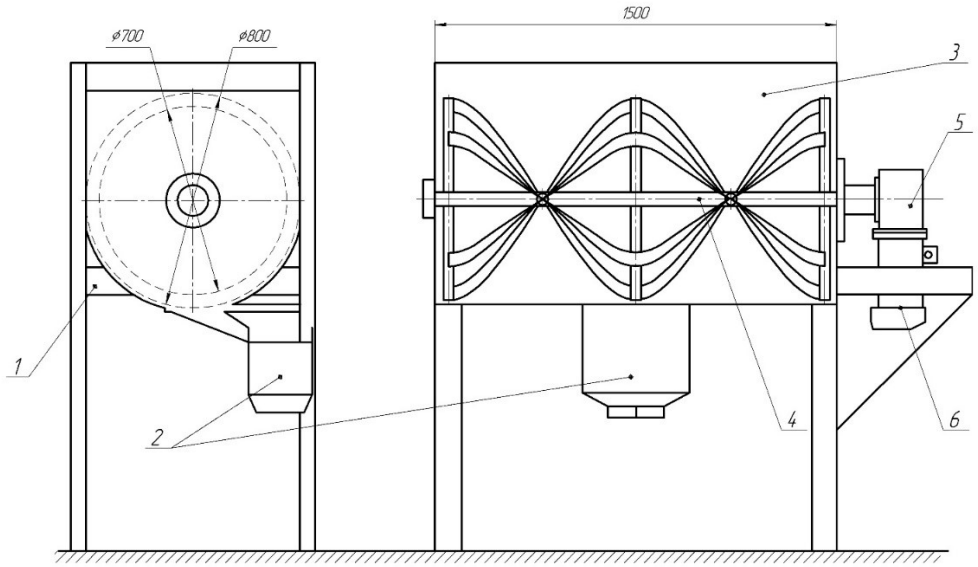
$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{B_i}{B_o} \text{ при } B_i<B_o, \tag{4}$$

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{2B_o - B_i}{B_o} \text{ при } B_i > B_o, \quad (5)$$

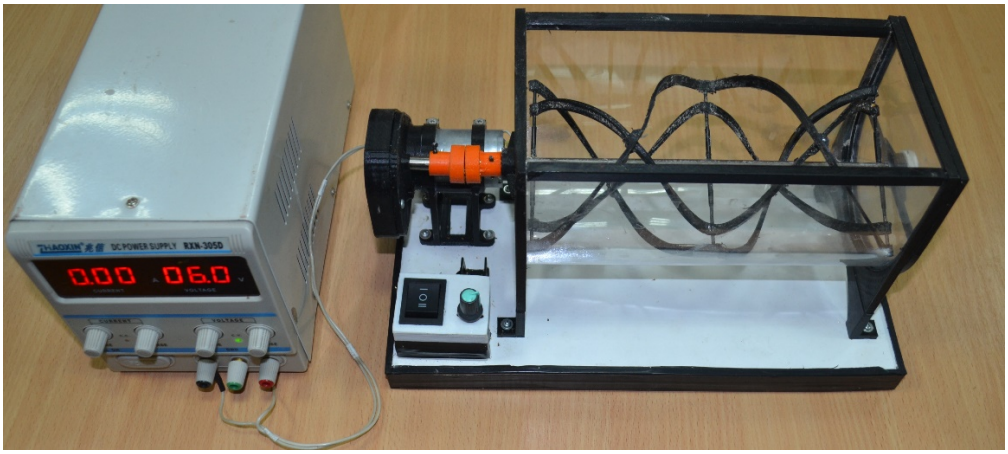
де n – число проб;

B_i – фактичний вміст меншого компонента суміші в і-ій пробі, кг;

B_o– заданий вміст меншого компонента, кг.



а



б

1 – рама; 2 – розвантажувальна горловина; 3 – бункер; 4 – мішалка; 5 – редуктор; 6 –електродвигун

Рисунок 1 – Компонувальна схема (а) і загальний вигляд (б) розробленого змішувача

Джерело: розроблено авторами

Заданий вміст меншого компонента B_o складав 5, 10 та 15 %. Фактичний вміст меншого компонента суміші в i - ій пробі визначали наступним чином:

$$B_i = \frac{m_i}{m_{пр}} \cdot 100, \quad (6)$$

де m_i – маса меншого компонента в пробі, кг;

$m_{пр}$ – маса проби, кг.

Маса однієї проби складала 2 % від загального завантаження змішувача, тобто 0,55 ±10 % кг. Для ідентифікації меншого компонента в пробі до змішувача завантажували пофарбоване у різні кольори зерно пшона (рис. 2).



Рисунок 2 – Зразки меншого компонента для введення до суміші
Джерело: розроблено авторами

Результати аналізу досліджень, які проводилися за допомогою методу математичного факторного планування експериментів, були оброблені за допомогою комп'ютерної програми Wolfram Cloud. Математична модель була розроблена для одного критерію оптимізації. Коефіцієнти регресії у математичних моделях були обчислені за відповідними формулами, які використовуються для D-оптимальних планів дослідів. На основі знайдених коефіцієнтів були створені рівняння регресії у кодованому вигляді.

Внаслідок проведених досліджень була побудована математична модель, яка вказує на вплив різних досліджуваних факторів на однорідність змішування. Отримана математична модель у розкодованому вигляді:

$$\mu = 64{,}04 + 1{,}04n - 0{,}01n^2 + 4{,}96t - 0{,}5t^2 + 0{,}033g - 0{,}021g^2 - 0{,}25nt, \quad (7)$$

де μ – однорідність змішування, %;
n – частота обертання валу мішалки, хв$^{-1}$;
t – час змішування, хв.;
g – вміст мінімального компоненту, %.

На рисунку 3 наведено графічне зображення взаємодій між різними факторами, що були досліджені, на однорідність змішування при зафіксованих оптимальних значеннях.

Залежність, представлена на рис. 3 свідчить про те, що зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при n=48 хв$^{-1}$ та t=3,2 хв. після чого спостерігається незначне зменшення. При цьому більш інтенсивний вплив здійснює час змішування. Вміст мінімального компоненту (рис. 3) не здійснює такого впливу і має лінійну залежність. Зважаючи на те, що час змішування та частота обертання робочого органу характеризують інтенсивність процесу змішування, можна стверджувати, що отримані результати цілком відповідають існуючій теорії змішування сипких кормів, коли по досягненню максимуму однорідності відбувається розшарування компонентів суміші, а, отже, зменшення її однорідності.

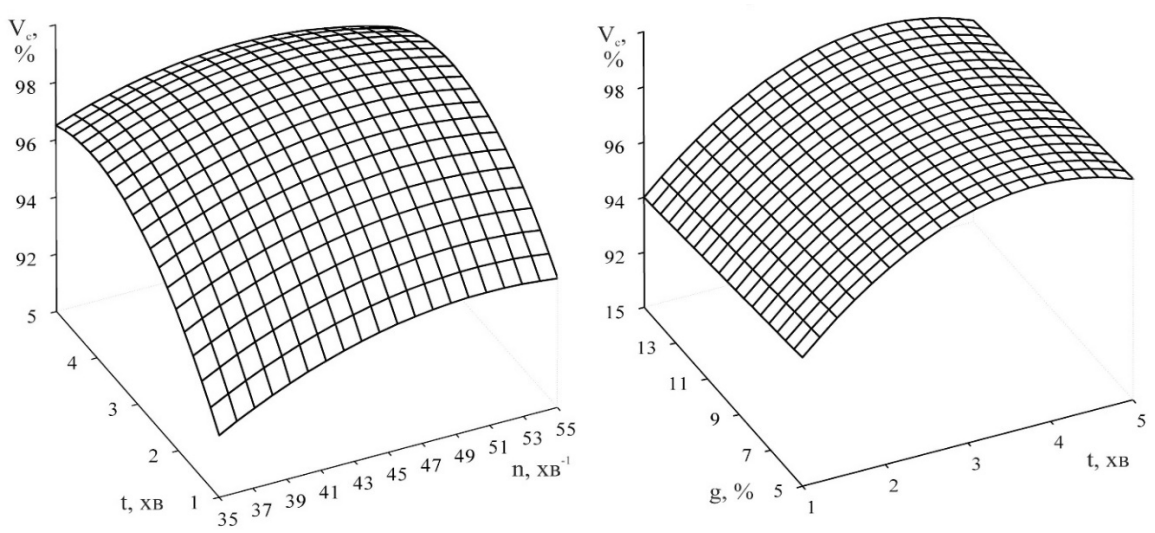


Рисунок 3 – Залежність однорідності змішування відчасу змішування, частоти обертання робочого органута вмісту мінімального компоненту

Джерело: розроблено авторами

Оскільки на практиці найменш об'ємний компонент зазвичай є добавкою промислового виробництва (наприклад, преміксом, БМВД і т. д.), це викликає цікавість щодо дослідження впливу режиму роботи змішувача на однорідність суміші при різних концентраціях цього компонента. Тому, враховуючи отримані під час експерименту дані, ми побудували залежність (рис. 4) за допомогою складного показника k, який в кінцевому підсумку визначає кількість переміщень компонентів суміші.

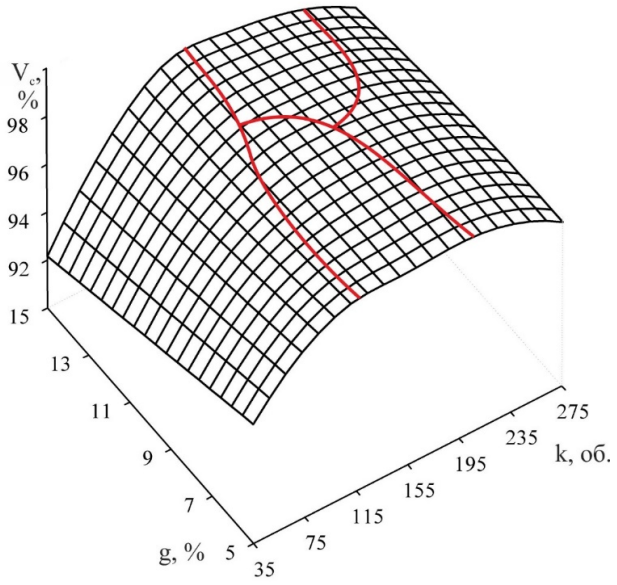


Рисунок 4 – Залежність однорідності змішування від режимного показника при різному вмісті мінімальногокомпоненту

Джерело: розроблено авторами

Як можна спостерігати на рисунку 4, характер процесу подібний до типової кінетики змішування сипких матеріалів. Спочатку відбувається інтенсивне перемішування (конвекція), після чого приріст однорідності зменшується, але

залишається на високому рівні (дифузія), а потім відбувається подальше зменшення однорідності (сегрегація).

При вмісті g = 5%, максимальний рівень однорідності спостерігається при значеннях k = 121 та k = 202 обертів, і між ними виділяється виразна область сегрегації. Зі збільшенням вмісту мінімального компонента ця область зменшується і при досягненні значення 10,5% вмісту мінімального компонента вона зміщується в часі. Отже, зі збільшенням вмісту мінімального компонента необхідно збільшувати кількість переміщень компонентів суміші. Для експериментального змішувача оптимальні значення комплексного показника k знаходяться в діапазоні від 120 до 170 обертів.

Таким чином керування процесом змішування можна здійснювати змінюючи час змішування при сталих обертах робочого органу, при цьому для різного вмісту найменшого компоненту він буде різний.

За результатами досліджень було отримано математичну модель впливу досліджуваних факторів на потужність на привід змішувача. Отримана математична модель мала вигляд:

$$N = 2{,}1455n^2 - 156{,}75n + 3551{,}7. \quad (8)$$

Згідно отриманих даних мінімальна потужність буде при мінімальній частоті обертання, але нам треба також враховувати, що зі зменшенням частоти обертання буде збільшуватись час змішування, що обумовлено якісними показниками процесу. Тому нами побудовано залежності витрат енергії на цикл змішування.

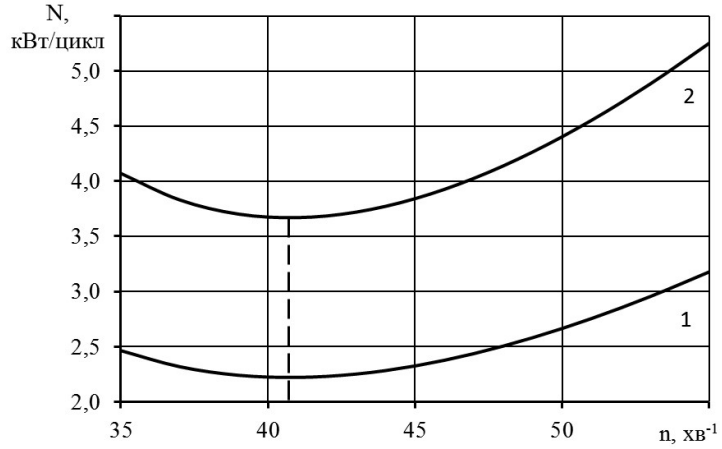
Було враховано значення показника k, при якому досягається максимум однорідності, в результаті чого було отримано наступну залежність:

$$N = \frac{k_{min}^{max}}{1000n_{min}} \cdot N = \frac{k_{min}^{max}}{1000n_{min}} \cdot (2{,}1455n^2 - 156{,}75n + 3551{,}7), \quad (9)$$

де n – поточна частота обертання, хв$^{-1}$;

n_{min}–мінімальна частота обертання згідно експерименту, хв$^{-1}$.

Графічну інтерпретацію рівняння за (9) представлено на рис. 5.



1 – мінімальна інтенсивність – k = min; 2 – мінімальна інтенсивність – k = max

Рисунок 5 – Залежність питомої енергоємності від частоти обертання робочого органу змішувача
Джерело: розроблено авторами

З представленої залежності чітко видно, що витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання 40,5 хв$^{-1}$, а не в мінімумі n. Це пояснюється

тим, що зі зменшенням частоти обертання збільшується час змішування і приріст витрат енергії не компенсує цього зменшення.

По проходженні точки мінімуму спостерігаємо суттєвий ріст питомої енергоємності. В цілому при мінімумі k витрати енергії на процес складають 2,25 кВт/цикл а при максимумі – 3,66 кВт/цикл.

На наступному етапі вважаємо за доцільне для визначеної частоти обертання встановити значення часу змішування. Користуючись математичною моделлю однорідності суміші (7) та враховуючи, що оптимальна частота обертання з точки зору енергетичних витрат буде рівна 40,5 хв$^{-1}$, побудуємо залежність, за допомогою якої можна визначати час змішування для різних варіацій вмісту найменшого компоненту (9).

Як видно з рис. 6, залежність часу змішування від вмісту мінімального компоненту нелінійна. Це можна пояснити тим, що крім типових процесів (конвекція, дифузія, сегрегація) протікають і інші. Наприклад зі збільшенням вмісту g від 8 до 11 % час змішування збільшується більш стрімко, ніж на інших ділянках.

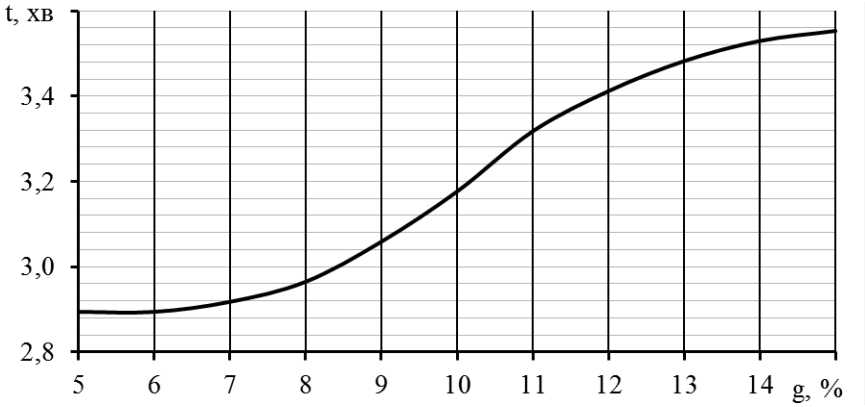


Рисунок 6 – Діаграма для вибору часу змішування при різному вмісті мінімального компоненту
Джерело: розроблено авторами

Це можна пояснити тим, що в зазначеному діапазоні g конвекційне змішування протікає повільніше а дифузійне ще не впливає так інтенсивно. З подальшим збільшенням g швидкість зазначених процесів вирівнюється тому час змінюється не так суттєво.

Використовуючи отримані під час експериментальних досліджень результати проведемо визначення основних конструкційно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів.

З аналізу потреби в таких машинах визначено, що необхідний об’єм бункера змішувача повинен бути в межах 0,4–0,45 м^3. Теоретично встановлено, що в заданому об’ємі корму рівномірність змішування компонентів буде максимальною при зовнішньому діаметрі гвинта (0,76–0,84 м) та її ширині – 0,05 м. При цьому кут нахилу стрічки за умови найменшого опору при її обертанні повинен бути в межах 50–80°. Інтерпретуючи ці дані за умови одного повного витка гвинта отримаємо довжину бункера – 1,5 м.

З експериментальних досліджень макетного зразка, виконаного у масштабі 1:4, встановлено, що частота обертання валу мішалки змішувача повинна складати 40–41 хв$^{-1}$. При цьому час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах 2,9–3,56 хв.

Висновки. В результаті лабораторних досліджень процесу змішування сипких кормів експериментальним змішувачем встановлено наступне:

– зі збільшенням часу та частоти обертання однорідність суміші збільшується і набуває максимуму 97,8 % при n = 48 хв$^{-1}$ та t = 3,2 хв. після чого спостерігається незначне зменшення;

– характер процесу близький до типової кінетики змішування сипких матеріалів;

– витрати енергії на процес мають нелінійний характер, при цьому оптимум (найменше значення) знаходиться в точці, яка відповідає значенню частоти обертання 40,5 хв$^{-1}$, а не в мінімумі n. При мінімумі k витрати енергії на процес складають 2,25 кВт/цикл а при максимумі – 3,66 кВт/цикл;

– час змішування буде різний для різного вмісту найменшого компоненту і знаходиться в межах 2,9–3,56 хв.;

– на основі отриманих даних встановлено раціональні параметри розроблюваного змішувача.

Список літератури

1. Ібатуллін І.І., Мельничук Д.О., Богданов Г.О. Годівля сільськогосподарських тварин: підручник. Вінниця: Нова книга, 2007. 612 с.
2. Бомко В.С., Сиваченко Є.В., Сметаніна О.В. Корми і кормові добавки та ефективність їх використання в годівлі тварин: навч. посібник. Біла Церква, 2023. 225 с. URL: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm_dobavky.pdf (дата звернення: 15.08.2023)
3. Бегма Н.А. Використання кормів: навч. посіб. Дніпро: ДДАЕУ, 2018. 168 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1362 (дата звернення: 16.08.2023)
4. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / Е. Б. Алієв та ін. ; за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА, 2022. 192 с. URL: http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf (дата звернення: 15.08.2023)
5. Алієв Е.Б., Пацула О.М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя : СТАТУС. 2017. URL: http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_2.pdf (дата звернення: 19.08.2023)
6. Shevchenko I., Aliiev E. Improving theefficiencyofthe process ofcontinuousflowmixing of bulkcomponents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6/1 (108). Pp. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
7. Liao C.C., Hsiaub S.S., Nien H.C. Effects of density ratio, rotation speed, and fill level on density-induced granular streak segregation in a rotating drum. Powder Technol. 2015. 284. Pp. 514–520. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.07.030.
8. Бакалов В.Г., Чередніченко П.І., Бакалов О.В. Змішувачі для сипких матеріалів і методи оцінювання якості суміші: монографія. Чернігів: ЧДТУ, 2013. 159 с. URL: http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2013.pdf (дата звернення: 21.08.2023)
9. Машини та обладнання для тваринництва: підручник / І.І.Евенко та ін. К.: ЦП «Компринт», 2018. 567 с.
10. Авраменко В.В. Обґрунтування параметрів спірального дозатора сипких кормів. Пояснювальна записка до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр». Керівник: Дудін В. Ю. ДДАЕУ, 2021. 102 с. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/3831/1/%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0% BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92.%D0%92..pdf (дата звернення: 19.08.2023)
11. Дудін В.Ю., Корнієнко А.А. Експериментальні дослідження процесу змішування сипких кормів. *Kluczoweaspektynaukowejdziałalności – 2016* : Materiały XII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji , Vol. 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Technicznenauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemyśl. Nauka i studia, 2016. С. 30–32.

12. Кісільов Р.В., Матвєєв К.Д., Лузан П.Г. Дослідження технологічної ефективності змішування кормів двоступеневим одновальним комбінованим змішувачем періодичної дії. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2013. Вип. 43 (II)ю. С. 108–112.

Referencis

1. Ibatullin, I.I., Melnychuk, D.O. & Bohdanov, H.O. (2007). *Hodivlia silskohospodarskykh tvaryn: pidruchnyk [Feeding of farm animals: a textbook]*. Vinnytsia: Nova knyha [in Ukrainian].
2. Bomko, V.S., Syvachenko, Ye.V., Smetanina, O.V. (2023). *Kormy i kormovi dobavky ta efektyvnist yikh vykorystannia v hodivli tvaryn: navch. Posibnyk [Fodder and feed additives and the effectiveness of their use in animal feeding: training. manual]*. Bila Tserkva. Retrieved from https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm_dobavky.pdf [in Ukrainian].
3. Behma, N. A. (2018). *Vykorystannia kormiv: navchalnyi posibnyk [The use of fodder: a study guide]*. Dnipro: DDAEU. Retrieved from https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1362 [in Ukrainian].
4. Aliiev, E. B., Mykolenko, S. Yu., Sova, N. A. et al. (2022). *Tekhniko-tekhnolohichne zabezpechennia bezvidkhodnoi pererobky zernovoi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektyvna monohrafiia [Technical and technological support for waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder: collective monograph]* / za zah. red. E. B. Aliieva. Dnipro: LIRA. Retrieved from http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf [in Ukrainian].
5. Aliiev, E.B., Patsula, O.M. & Hrytsenko, V.T. (2017). *Tekhnolohiia kompleksnoi bezvidkhidnoi pererobky makukhy z nasinnia oliinykh kultur z oderzhanniam vysokoiakisnykh povnotsinnykh proteinovykh dobavok u vyhliadi pelet ta tverdoho biopalyva [Technology of complex waste-free processing of cake from oilseeds to obtain high-quality complete protein supplements in the form of pellets and solid biofuel]:* Naukovo-metodychni rekomendatsii. Instytut oliinykh kultur Natsionalnoi akademii ahrarnykh nauk Ukrainy. Elektronnyi analoh drukovanoho vydannia (elektronna knyha). Zaporizhzhia : STATUS. Retrieved from http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_2.pdf [in Ukrainian].
6. Shevchenko, I. & Aliiev, E. (2020). Improving theefficiency ofthe process ofcontinuous flowmixing of bulkcomponents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6/1 (108)*, 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
7. Liao, C. C., Hsiaub, S. S. & Nien, H. C. (2015). Effects of density ratio, rotation speed, and fill level on density-induced granular streak segregation in a rotating drum. *Powder Technol, 284,* 514–520. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.07.030.
8. Bakalov, V.H., Cherednichenko, P.I. & Bakalov O.V. (2013). *Zmishuvachi dlia sypkykh materialiv i metody otsiniuvannia yakosti sumishi: monohrafiia [Mixers for loose materials and methods of evaluating the quality of the mixture: a monograph]*. Chernihiv: ChDTU. Retrieved from http://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/9028/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_2013.pdf [in Ukrainian].
9. Revenko, I. I., Brahinets, M. V., Khmelovskyi, V. S., Rebenko, V. I., Zabolotko O. O., Potapova, S. Ye., Achkevych, O. M. & Radchuk V. V. (2018). *Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnytstva: Pidruchnyk [Machinery and equipment for animal husbandry: Textbook]*. K.: TsP «Komprynt» [in Ukrainian].
10. Avramenko, V.V. (2021). *Obgruntuvannia parametriv spiralnoho dozatora sypkykh kormiv [Justification of the parameters of the spiral bulk feed dispenser]*. Poiasniuvalna zapyska do dyplomnoi roboty osvitnoho stupenia «Mahistr». Kerivnyk: Dudin V. Yu. DDAEU. Retrieved from https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/3831/1/%D0%90%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92.%D0%92..pdf [in Ukrainian].
11. Dudin, V. Yu. & Korniienko, A. A. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia protsesu zmishuvannia sypkykh kormiv [Experimental studies of the process of mixing loose fodder]. Materiały XII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2016» Volume 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemyśl. Nauka i studia: 30–32. [in Ukrainian].
12. Kisilov, R. V., Matvieiev, K. D., Luzan, P. H. (2013). Doslidzhennia tekhnolohichnoi efektyvnosti zmishuvannia kormiv dvostupenevym odnovalnym kombinovanym zmishuvachem periodychnoi dii [Study of the technological efficiency of feed mixing with a two-stage single-phase combined mixer of periodic action]. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, Issue 43 (II),* 108–112. [in Ukrainian].

Volodymyr Dudin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Govorukha**, Prof., DSc.
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Justification of the Structural and Technological Parameters of the Belt-screw Mixer of Loose Fodder

The purpose of the work was to substantiate the operational parameters of the belt-screw mixer of bulk feed on the basis of experimental studies of the process.

As a result of experimental studies of the process of mixing loose feed with an experimental mixer, the following was established. With increasing time and rotation frequency, the homogeneity of the mixture increases and reaches a maximum of 97.8% at n = 48 min-1 and t = 3.2 min. after which there is a slight decrease. The nature of the process is close to the typical kinetics of mixing loose materials. The energy consumption for the process is non-linear in nature, while the optimum (the smallest value) is located at the point corresponding to the value of the rotation frequency of 40.5 min-1, and not at the minimum n. At minimum k, energy consumption for the process is 2.25 kW/cycle, and at maximum – 3.66 kW/cycle. The mixing time will be different for different contents of the smallest component and is within 2.9–3.56 min.

Based on the obtained data, the rational parameters of the mixer under development were established.

feed, mixing, loose components, experiment, parameters, quality of mixing, energy consumption, rotation frequency, duration of the process

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.363:636.087 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.121-130

Е. Б. Алієв, ст.досл., проф., д-р техн. наук, **В. Ю. Дудін,** доц., канд. техн. наук,
М. О. Лінко, асп.
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

Застосування експандерів є необхідним у виробництві кормів і харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість і поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки їх високій продуктивності і можливості регулювання тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їх корисні властивості. Отже, оптимізація технологічних параметрів для формування експандатів залишається актуальною задачею в інжинірингу експандерів. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів малогабаритного експандера кормів експериментальним шляхом. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q, його споживаної потужності N, питомої енергоємності процесу експандування q і щільності отриманих експандатів ρ від вологості комбікорму W, зазору між конусом та гайкою δ_c, частоти обертання гвинта n. Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування q = 30,7 кВт·год/т встановлено, що W = 27,1 %, δ_c = 3,7 мм, n = 54,4 об/хв. При цьому продуктивність складала Q = 28,8 кг/год, споживана потужність N = 879 Вт, а щільність експандатів ρ = 336 кг/м^3.

корма, експандер, експеримент, параметри, продуктивність, енергоємність, вологість, частота обертання, зазор, конус

© Е.Б. Алієв, В.Ю. Дудін, М. О. Лінко, 2023

Постановка проблеми. Сьогодні значна частина рослинної сировини, яка використовується у виробництві харчових продуктів і кормів, піддається експандуванню [1, 2]. Перевагою цієї технології є радикальна зміна структури сировини, її фізичних властивостей, поживної цінності, а також хімічного складу в процесі обробки [3]. Крім того, експандування надає можливість широко змінювати властивості готового продукту шляхом варіювання параметрами процесу [4, 5].

Експандуванню і екструзії піддається різноманітний спектр рослинної сировини: зерно, бобові, фрукти, овочі, коренеплоди, листя та стебла рослин, а також їхні суміші [6]. Важливою перевагою технології експандування і екструзії є можливість переробки відходів харчової промисловості і агропромислового виробництва, таких як віджатки плодів, шкірки фруктів, макуха, жом тощо, з метою їх подальшого використання у складі харчових продуктів або кормів [2, 3, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для здійснення процесу експандування і екструзії використовують одногвинтові та двогвинтові екструдери [4]. Незважаючи на велике різноманіття моделей, їх конструкція схожа та включає бункер для завантаження сировини, гвинт з винтовою спіраллю, що обертається у нерухомому циліндричному корпусі, у кінці якого є отвір (фільєра) для виходу експандату [3, 8]. Додатково до конструкції екструдера або експандера можуть включати електричні обігрівачі корпусу для підвищення температури процесу та пристрої для подачі в корпус води чи пари для зволоження сировини [9]. Одногвинтові пристрої зазвичай використовують для обробки однокомпонентних або багатокомпонентних продуктів, а двогвинтові – для отримання складних багатокомпонентних продуктів [10].

Зазвичай у екструдер або еспандер завантажують попередньо підготовлену рослинну сировину або суміш сировинних компонентів за допомогою методів подрібнення, зволоження та кондиціонування [11]. Сировина, яку переміщує гвинт по корпусу під дією високого тиску та температури, а також різкого перепаду тиску при виході з фільєри, змінює свою структуру та властивості [5, 12]. В якості змінних вхідних параметрів, які змінюють хід процесу експандування (екструзії) та властивості готового експандату, зазвичай виступають швидкість подачі сировини в екструдер, частота обертання шнека, співвідношення діаметра та довжини шнека, температура екструзії, тиск та діаметр фільєри [4, 13]. Також значення мають початкові властивості сировини, такі як вологість, ступінь подрібнення, хімічний склад, жирність тощо [5, 14].

Під час процесу екструзії рослинна сировина зазнає цілого ряду фізико-хімічних змін та змін у поживній цінності [14]. Ці зміни включають окислення жирів, денатурацію білка, формування хрестових зв'язків між білками та іншими речовинами, желатинізацію та декстринизацію крохмалю, руйнування вітамінів та каротину, денатурацію ферментів, зміну структури (консистенції), кольору та запаху продукту [14, 15]. Ці зміни є результатом комплексного впливу на сировину зазначених вище змінних вхідних параметрів процесу екструзії або експандування [5, 6, 13].

Параметри процесу екструзії або експандування рослинної сировини змінюються з метою отримання продукту з необхідними властивостями та забезпечення мінімального зменшення поживної цінності продукту через руйнування корисних речовин [16].

Під час експандованого приготування кормів важливу роль відіграють фізико-технологічні аспекти, такі як теплопередача, масообмін, передача імпульсу, тиск та тривалість дії температури [17, 18]. Ці фактори мають значний вплив на властивості харчових продуктів і кормів і можуть суттєво впливати на якість кінцевого продукту.

Тому належна регуляція і контроль цих параметрів є ключовими аспектами процесу експандованого приготування кормів.

Застосування експандерів є необхідним у виробництві кормів і харчових продуктів, оскільки ці технічні засоби дозволяють покращити якість і поживні характеристики кінцевого продукту. Завдяки їх високій продуктивності і можливості регулювання тиску, експандери забезпечують ефективну обробку матеріалів, зберігаючи при цьому їх корисні властивості.

Отже, оптимізація технологічних параметрів для формування експандатів залишається актуальною задачею в інжинірингу експандерів.

Постановка завдання. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів малогабаритного експандера кормів експериментальним шляхом.

Виклад основного матеріалу. На початку досліджень готували зразки комбікорму відповідного гранулометричного складу з розміром часток 1,2–2,4 мм. В якості складових комбікорму, у співвідношенні 25 : 25 : 25 : 25 %, використовували зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникову макуху, подрібнені за допомогою дискового подрібнювача, який дозволяє забезпечити вищу (біля 92 %), ніж молотковий, однорідність подрібнення [19]. Приготування комбікорму проводили за допомогою лабораторного спірально-гвинтового змішувача сипких матеріалів, який дозволяє отримувати суміші однорідністю 94–98 % [20].

Вихідну вологість (10 ± 2 %) зразків комбікорму змінювали шляхом додавання відповідної кількості води:

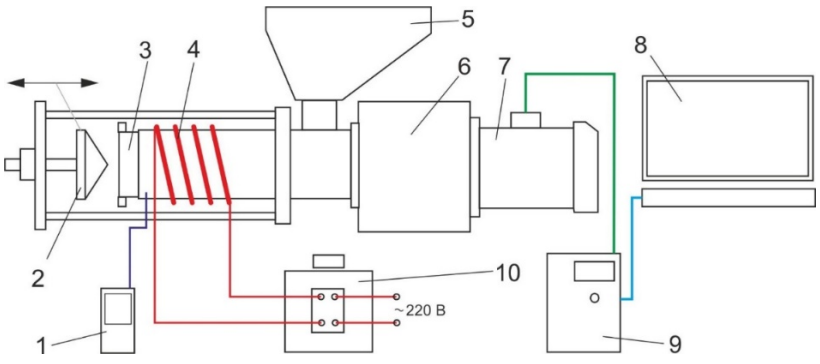
$$m_в = т_з\left(\frac{100 - W_0}{100 - W_п} - 1\right), \quad (1)$$

де $m_в$, $m_з$ – маса води та зразка комбікорму відповідно, кг;

W_0, $W_п$ – вихідна вологість та вологість, яку необхідно отримати, %.

На основі результатів теоретичних досліджень [21, 22] було розроблено та реалізовано експериментальний зразок експандера комбікормів, який став основою дослідної установки, приведеної на рис. 1.

Змінними факторами експериментальних досліджень були зазор між запираючим конусом та гайкою δ_c (1–5 мм), частота обертання гвинта n (30–60 об/хв) і вологість комбікорму W (20–30 %). Критерії оптимізації: споживана потужність N, продуктивність Q експериментального експандера і щільність отриманих експандатів ρ.



а



б

1 – цифровий термометр з термопарою FLUS ET-960; 2 – запираючий конус; 3 – гайка з роздільником потоку; 4 – повітряний ТЕН нагріву робочої камери; 5 – бункер завантаження; 6 – черв'ячний редуктор NMRV-63 (1:25); 7 – електродвигун AIP/5AI80A4; 8 – ПЕОМ; 9 – частотний перетворювач HYUNDAI N700E; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М; 11 – тахометр Benetech GM8905

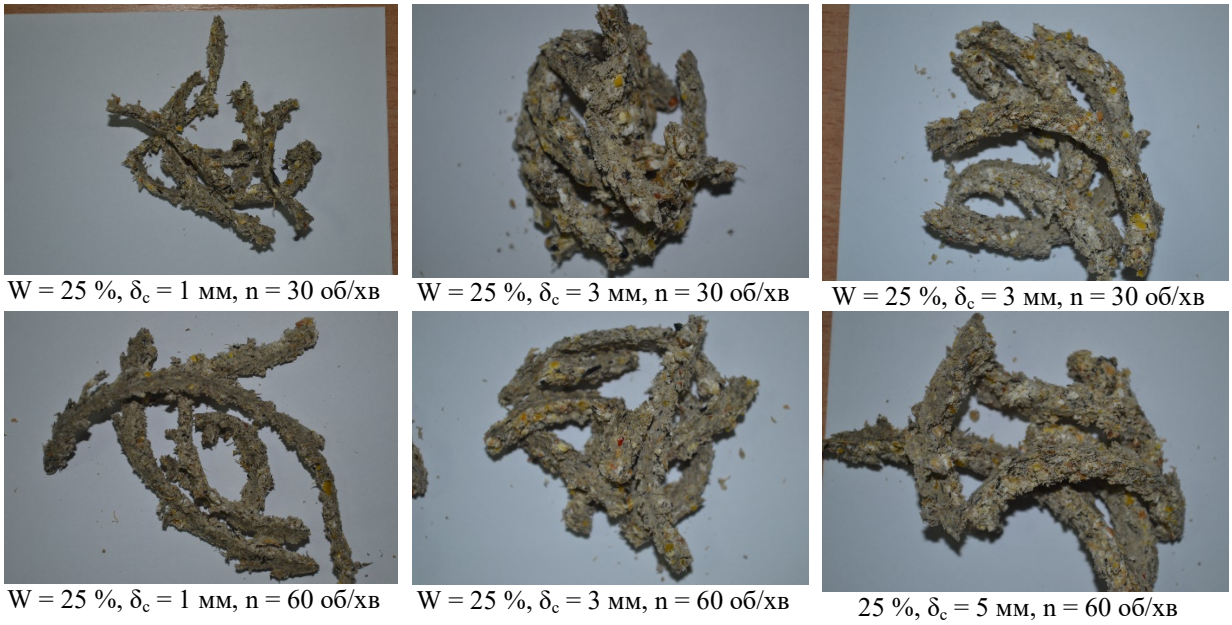
Рисунок 1 – Схема (а) та загальний вигляд (б) дослідної установки

Джерело: розроблено авторами

Дослідження проведені за планом Бокса-Бенкіна BB_3 у триразовій повторності.

Відповідну частоту обертання гвинта встановлювали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E та контролювали за допомогою тахометра Benetech GM8905. Відповідний зазор між запираючим конусом та гайкою встановлювали шляхом обертання гвинта, на якому встановлено конус, та контролювали за допомогою глибиноміра штангенциркуля ШЦ-150-0,1. Температуру в робочій камері підтримували на рівні 136±2 °С за допомогою повітряного ТЕНу, ступінь нагріву якого регулювали зміною струму живлення лабораторним автотрансформатором ЛАТР-1М. Потужність приводу N знімали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E з наступним поточним записом за допомогою персонального комп'ютера, на якому встановлено програмне забезпечення N700 HIMS. Продуктивність експандера Q визначали, виходячи з часу, затрачуваного на переробку однієї наважки, яка складала 1 кг. Затрачуваний час визначали за допомогою секундоміра. Питому енергоємність процесу q визначали як відношення затрачуваної потужності N до продуктивності Q. Щільність отриманих експандатів ρ визначалась з використанням методу гідростатичного зважування.

У відповідності до представленої методики проведені багатофакторні експериментальні дослідження процесу роботи малогабаритного експандера кормів. Загальний вигляд зразків отриманого продукту (експандатів) приведені на рис. 2.



W = 25 %, δ_c = 1 мм, n = 30 об/хв | W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 30 об/хв | W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 30 об/хв

W = 25 %, δ_c = 1 мм, n = 60 об/хв | W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 60 об/хв | 25 %, δ_c = 5 мм, n = 60 об/хв

Рисунок 2 – Зразки отриманого продукту

Джерело: розроблено авторами

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність продуктивність екпандера Q від факторів досліджень (рис. 3):

$$Q = 1{,}78314 + 0{,}401115\ n + 1{,}41111\ \delta_c. \quad (2)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 1{,}99 < F_{0{,}05}(12;30) = 2{,}09$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0{,}1082 < G_{0{,}05}(2;15) = 0{,}3346$.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність споживаної потужності N від факторів досліджень (рис. 3):

$$N = 898{,}22 + 12{,}0228\ n - 15{,}1022\ W - 186{,}449\ \delta_c + 31{,}0749\ \delta_c^2. \quad (3)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 0{,}984 < F_{0{,}05}(11;30) = 2{,}13$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0{,}1456 < G_{0{,}05}(2;15) = 0{,}3346$.

З рис. 3 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n і зазору між конусом та гайкою δ_c продуктивність екпандера Q збільшується. В свою чергу вологість комбікорму W не впливає на продуктивність. Із збільшенням частоти обертання гвинта n споживана потужність екпандера Q збільшується, що є цілком логічним. Зменшення вологості комбікорму W також спричиняє збільшення потужності N. Це пояснюються збільшення сил внутрішнього і зовнішнього тертя, що виникають між частинками комбікорму і поверхнею робочих органів екпандера. Для зазора спостерігається наявність оптимуму δ_c = 3,1 мм, при якому потужність екпандера N є мінімальною.

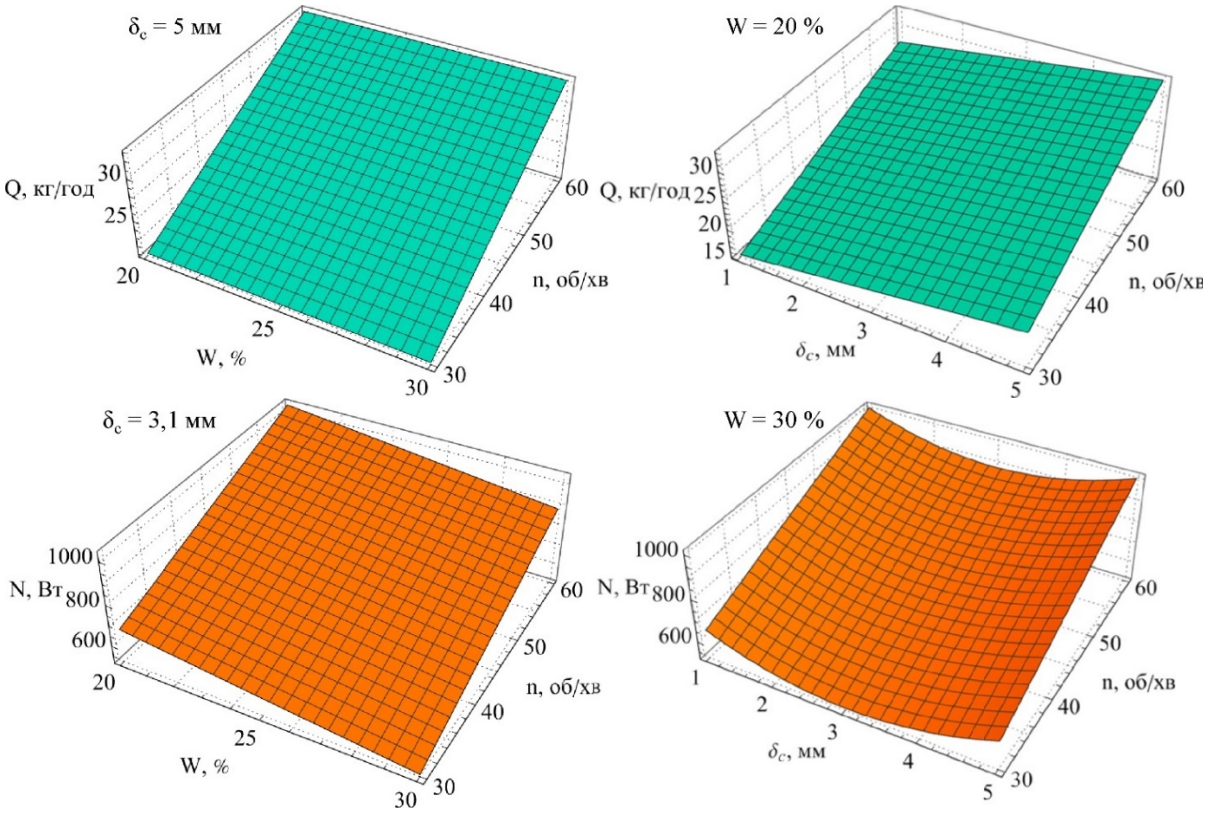


Рисунок 3 – Залежність продуктивності Q і споживаної потужності експандера N від вологості комбікорму W, зазору між конусом та гайкою δ_c, частоти обертання гвинта n

Джерело: розроблено авторами

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни питомої енергоємності процесу експандування q від факторів досліджень (рис. 4):

$$q = 111{,}597 - 0{,}785547\ n + 0{,}00721513\ n^2 - 2{,}8468\ W + \\ + 0{,}0524621\ W^2 - 11{,}2437\ \delta_c + 1{,}51579\ \delta_c{}^2. \quad (4)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 0{,}8698 < F_{0,05}(8;30) = 2{,}27$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0{,}841 < G_{0,05}(2;15) = 0{,}3346$.

Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при яких спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування q = 30,7 кВт·год/т встановлено, що W = 27,1 %, δ_c = 3,7 мм, n = 54,4 об/хв. При цьому продуктивність складала Q = 28,8 кг/год, а споживана потужність N = 879 Вт.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни щільності експандатів ρ від факторів досліджень (рис. 4):

$$q = 264{,}289 - 0{,}825\ n + 12{,}902\ W - 0{,}279201\ W^2 - 7{,}25791\ \delta_c{}^2. \quad (5)$$

Отримана модель адекватна за критерієм Фішера $F_p = 2{,}1118 < F_{0,05}(10;30) = 2{,}16$, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена $G_p = 0{,}1414 < G_{0,05}(2;15) = 0{,}3346$.

З рис. 4 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n щільність експандатів ρ зменшується. Це пояснюється тим, що збільшення частоти обертання зменшує час перебування матеріалу в області шнека, де відбуваються фізико-хімічні

процеси утворення експандату. Збільшення зазору між конусом та гайкою δ_c призводить до зменшення щільності, що також є цілком логічним: не утворюється необхідного підпору з боку конуса. Вологість матеріалу має оптимальне значення на рівні W = 23,1 %, що практично наближене до значення, яке отримано при лабораторних дослідженнях.

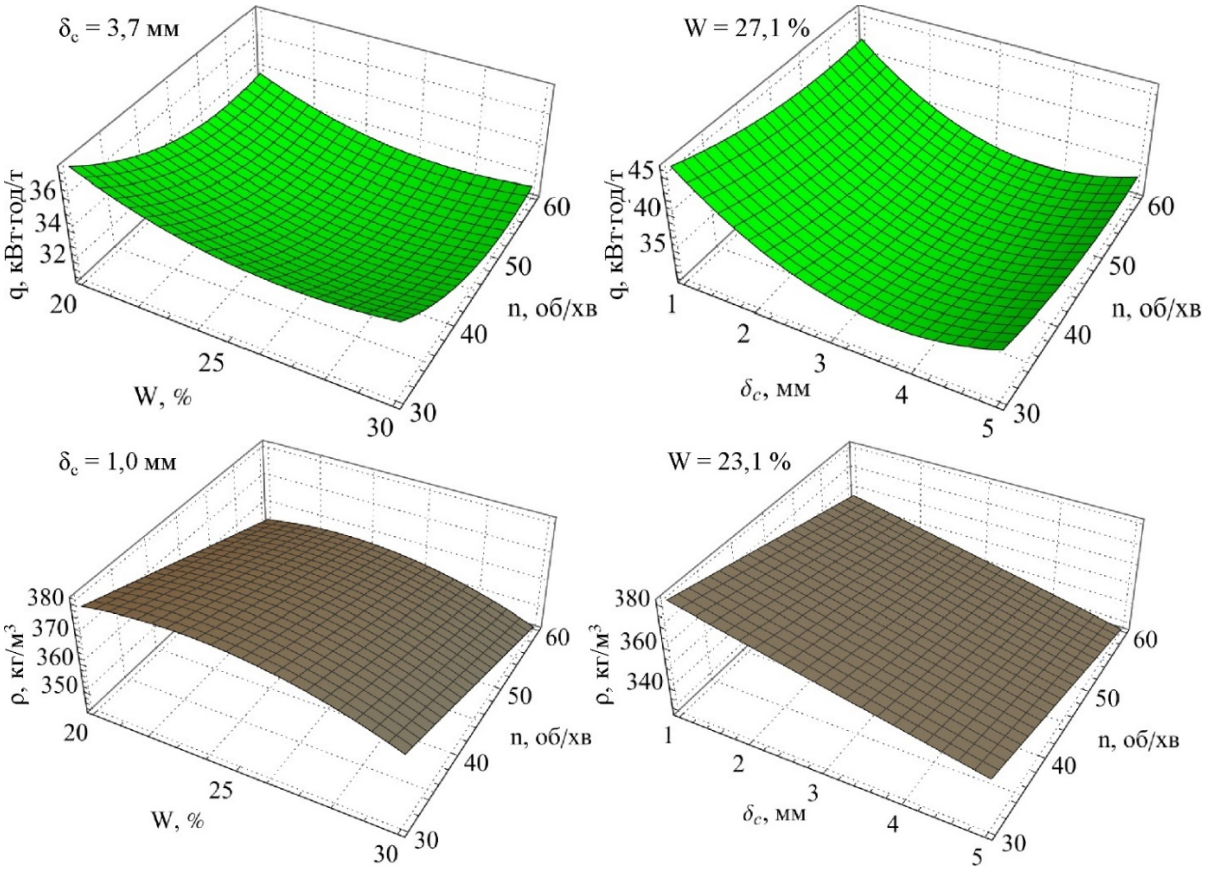


Рисунок 4 – Залежність питомої енергоємності процесу експандування q і щільності експандатів ρ від вологості комбікорму W, зазору між конусом та гайкою δ_c, частоти обертання гвинта n

Джерело: розроблено авторами

Також встановлено, що при раціональних значеннях W = 27,1 %, δ_c = 3,7 мм, n = 54,4 об/хв, при яких питома енергоємність процесу експандування q є мінімальною, щільність експандатів складає ρ = 336 кг/м^3.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q (1), його споживаної потужності N (2), питомої енергоємності процесу експандування q (3) і щільності отриманих експандатів ρ (4) від вологості комбікорму W, зазора між конусом та гайкою δ_c, частоти обертання гвинта n.

Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при яких спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування q = 30,7 кВт·год/т, встановлено, що W = 27,1 %, δ_c = 3,7 мм, n = 54,4 об/хв. При цьому продуктивність складала Q = 28,8 кг/год, споживана потужність N = 879 Вт, а щільність експандатів ρ = 336 кг/м^3.

Список літератури

1. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / Е. Б.Алієв та ін. ; за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА, 2022 . 192 с. ISBN 978-966-981-687-0. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf (дата звернення: 17.08.2023)
2. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 2019. 59 (18). 2979–2998. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007.
3. Leonard W., Zhang P., Ying D., Fang Z. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 2020. 19 (1): 218–246. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514.
4. Adekola K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*. 2016. 6 (3): 149–168. https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005.
5. Bordoloi R., Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology.* 2014. 2 (1): 1–3.
6. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology.* 2007. Vol. 42 (8): 916–929. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x.
7. Jozinović A., Ačkar Đ., Babić J., Miličević B., Jokić S., Šubarić D. The application of some food industry by-products in the production of extruded products. *Engineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering.* 2017. 12 (1): 2–6.
8. Park S. H., Lamsal B. P., Balasubramaniam V. M. Principles of food processing. Food processing: principles and applications. Second Edition. 2014. 1–15. https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1.
9. Choton S., Gupta N., Bandral J. D., Anjum N., Choudary A. Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 2020. 9 (2): 162–168. https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367
10. Ramachandra H. G., Thejaswini M. L. Extrusion technology: a novel method of food processing. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*. 2015. 2 (4): 358–369.
11. Shelar G. A., Gaikwad S. T. Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal*. 2019. 8 (2): 562–568.
12. Navale A. S., Swami B. S., Thakor N. J. Extrusion cooking technology for foods: A Review. *Journal of Ready to Eat Food*. 2015. 2 (3): 66–80.
13. Singh B., Sharma C., Sharma S. Fundamentals of extrusion processing. Novel Food Processing Technologies. New Delhi: New India Publishing Agency. 2017. 1–45. https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n
14. Alam M. S., Kaur J., Khaira H., Gupta K. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. 56 (3): 445–473. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568.
15. Roye C., Henrion M., Chanvrier H., De Roeck K., De Bondt Y., Liberloo I., King R., Courtin C. M. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods*. 2020. 9(6): 738. https://doi.org/10.3390/foods9060738
16. Ajita T., Jha S. K. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*. 2017. 6 (1): 113–128. https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10.
17. Fancher B. I., Rollins D., Trimbee B. Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance1. *Journal of Applied Poultry Research*. 1996. 5 (4): 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386
18. Guy R. Extrusion Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 2001. 206 p. URL: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_ applications.pdf
19. Дудін В. Ю., Губа Є. В. Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. *Материали за 12-а международна научна практична конференция, «Настоящи изследвания и развитие – 2016».* Том 8. Лекарство. Биологии. Химия и химически технологии. Екология. География и геология. Селско стопанство (15–22-ти януари 2016). София. «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2016. С. 85–87.
20. Дудін В. Ю., Корнієнко А. А. Експериментальні дослідження процесу змішування сипких кормів. *Materiały XII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016»* Volume 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemyśl. Nauka i studia, (2016). P. 30–32.

21. Алієв, Е. Б., Лінко, М. О., Алієва, О. Ю. Симуляція процесу експандованого приготування кормів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч.II. С.176–185. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185
22. Aliiev E., Dudin V., Linko M. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 2022. 13(3). P. 9-16. https://doi.org/10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16

Referencis

1. Aliyev, E. B., Mykolenko, S. Yu., Sova, N. A. et al. (2022). *Tekhniko-tekhnolohichne zabezpechennya bezvidkhodnoyi pererobky zernovoyi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektyvna monohrafiya [Technical and technological support of waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder: collective monograph / by general]*. E. B. Aliyeva (Eds.). Dnipro: LIRA ISBN 978-966-981-687-0. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf [in Ukrainian].
2. Offiah, V., Kontogiorgos, V. & Falade, K. O. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59 (18),* 2979–2998. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007 [in English].
3. Leonard, W., Zhang, P., Ying D. & Fang Z. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 19 (1),* 218–246. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514 [in English].
4. Adekola, K. A. (2016). Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering, 6 (3),* 149–168. https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005 [in English].
5. Bordoloi, R. & Ganguly, S. (2014). Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology, 2 (1),* 1–3 [in English].
6. Singh, S., Gamlath, S. & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology, 42 (8),* 916–929. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x [in English].
7. Jozinović, A., Ačkar, Đ., Babić, J., Miličević, B., Jokić, S. & Šubarić, D. (2017). The application of some food industry by-products in the production of extruded products. *Enineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering, 12 (1),* 2–6 [in English].
8. Park, S. H., Lamsal B. P. & Balasubramaniam V. M. (2014). *Principles of food processing. Food processing: principles and applications.* Second Edition: 1–15. https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1 [in English].
9. Choton, S., Gupta, N., Bandral J. D., Anjum, N. & Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. *The Pharma Innovation Journal, 9 (2)* , 162–168. https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367 [in English].
10. Ramachandra, H. G. & Thejaswini, M. L. (2015). Extrusion technology: a novel method of food processing. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, *2 (4)* , 358–369 [in English].
11. Shelar, G. A. & Gaikwad, S. T. (2019). Extrusion in food processing: An overview. *The Pharma Innovation Journal*, *8 (2)* , 562–568 [in English].
12. Navale, A. S., Swami, B. S., Thakor, N. J. (2015). Extrusion cooking technology for foods: A Review. *Journal of Ready to Eat Food, 2 (3) ,* 66–80 [in English].
13. Singh, B., Sharma, C. & Sharma S. (2017). *Fundamentals of extrusion processing.* Novel Food Processing Technologies. New Delhi: New India Publishing Agency. 1–45. https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n [in English].
14. Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H. & Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *56 (3)* , 445–473. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568 [in English].
15. Roye, C., Henrion, M., Chanvrier, H., De Roeck, K., De Bondt, Y., Liberloo, I., King, R. & Courtin, C. M. (2020). Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods, 9(6)*, 738. https://doi.org/10.3390/foods9060738 [in English].
16. Ajita, T. & Jha, S. K. (2017). Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*, *6 (1)*, 113–128. https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10 [in English].

17. Fancher, B. I., Rollins, D. & Trimbee, B. (1996). Feed Processing Using the Annular Gap Expander and Its Impact on Poultry Performance1. *Journal of Applied Poultry Research, 5 (4),* 386–394. DOI: 10.1093/japr/5.4.386 [in English].
18. Guy, R. (2001). *Extrusion Cooking. Technologies and Applications.* CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 206 p. Retrieved from: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_ applications.pdf [in English].
19. Dudin, V. Yu. & Huba, Ye. V. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia dyskovoho podribniuvacha zerna [Experimental studies of the disk grain chopper]. *Nastoiashchy yzsledvanyia y razvytye – 2016*: 12-a mezhdunarodna nauchna praktychna konferentsyia, Vol.8. Lekarstvo. Byolohyy. Khymyia y khymychesky tekhnolohyy. Ekolohyia. Heohrafyia y heolohyia. Selsko stopanstvo (15–22-ty yanuary 2016). Sofyia. «Bial HRAD-BH» OOD: 85–87. [in Ukrainian].
20. Dudin V. Yu. & Korniienko A. A. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia protsesu zmishuvannia sypkykh kormiv [Experimental studies of the process of mixing loose fodder.]. *Kluczowe aspekty naukowej działalności – 2016*: XII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Vol. 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemyśl. Nauka i studia: 30–32. [in Ukrainian].
21. Aliiev, E. B., Linko, M. O. & Aliieva, O. Yu. (2022). Symuliatsiia protsesu ekspandovanoho pryhotuvannia kormiv [Simulation of the process of expanded feed preparation]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 5(36), II,* 176–185. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185 [in Ukrainian].
22. Aliiev, E., Dudin, V. & Linko, M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics, 13(3),* 9-16. https://doi.org/10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16 [in English].

Elchyn Aliiev, Senior Researcher, Prof., DSc., **Volodymyr Dudin,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Linko**, post graduate student
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Experimental Studies of a Small-sized Fodder Expander

The purpose of the research is to substantiate the structural and technological parameters of the small-sized fodder expander experimentally.

The use of expanders is necessary in the production of feed and food products, as these technical means allow to improve the quality and nutritional characteristics of the final product. Thanks to their high productivity and the ability to adjust pressure, expanders provide effective processing of materials, while preserving their useful properties. Therefore, the optimization of technological parameters for the formation of expanders remains an urgent task in the engineering of expanders.

As a result of experimental studies of a small-sized fodder expander, the dependences of the change in the productivity of the expander Q, its consumed power N, the specific energy capacity of the expansion process q and the density of the obtained expanders ρ on the moisture content of the compound feed W, the gap between the cone and the nut δ_c, and the frequency of rotation of the screw n were established. Having found in the Wolfram Cloud software package the value of the research factors in which the minimum value of the specific energy intensity of the expansion process q = 30.7 kWh/t is observed, it was established that W = 27.1 %, δ_c = 3.7 mm, n = 54.4 rpm. At the same time, the productivity was Q = 28.8 kg/h, the power consumption N = 879 W, and the density of the expanders ρ = 336 kg/m^3.

feed, expander, experiment, parameters, performance, energy consumption, humidity, rotation frequency, gap, cone

Одержано (Received) 29.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 12.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.3 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.131-138

К.В. Васильковська, канд. техн. наук**, О.О. Андрієнко,** доц., канд. с.-г. наук,
В.О. Малаховська, викл.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasilkovskakv@ukr.net

Аналіз енергоефективності сільськогосподарських дронів у системі точного землеробства

В статті зроблено порівняльний аналіз енергоефективності наземних обприскувачів та дронів для сільського господарства. Для цього обрано найбільш використовувані в Україні моделі самохідних обприскувачів та сільськогосподарських дронів. Проаналізовано функціональні та технологічних можливості сільськогосподарських дронів в порівнянні з наземними обприскувачами. Порівняння технологічного процесу обприскування самохідними обприскувачами та сільськогосподарськими дронами виявлено ряд переваг безпілотних літальних апаратів.
точне землеробство, географічна інформаційна система, сільськогосподарські дрони, обприскування посівів, питомі енерговитрати, ефективність

Постановка проблеми. В системі точного землеробства поєднано в єдину технологічну лінію операції із обробітку ґрунту, проведення висіву, внесення добрив, застосування хімікатів і стимуляторів росту та збирання врожаю [1, 2].

Використання дронів для обприскування та моніторингу посівів – стало невід'ємною частиною сучасної системи точного землеробства. На сьогоднішній день, сільськогосподарські дрони є важливим сегментом світового ринку, який стрімко розвивається, в тому числі і в Україні [3]. Неможливість під час війни використання сільськогосподарської авіації, дало поштовх до збільшення попиту на сільськогосподарські дрони для внесення добрив та засобів захисту рослин [4].

Отже, пошук нових технологічних рішень для збільшення врожайності сільськогосподарських культур є першочерговою умовою при переході на новий рівень господарювання, збільшення конкурентоспроможності галузі аграрного виробництва та продовольчої безпеки країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, однорідних земельних ділянок не існує, навіть в межах одного поля. Ділянки відрізняються між собою за складом ґрунту, вологістю та наявністю елементів живлення рослин, що так чи інакше впливає на їх врожайність[5].

Як новітній метод ведення сільськогосподарського виробництва, система точного землеробства започатковано саме із ідеї різного запиту на виконання різних технологічних операцій, враховуючи при цьому врожайність на різних ділянках поля. Таким чином, точне землеробство – це система, яка передбачає спостереження, вимірювання та врахування мінливість врожайності сільськогосподарських культур і ґрунтів під ними та застосуванні геоінформаційних технологій [6].

Як новітня система ведення господарства, точне землеробство бере початокіз 80-х рр. XX сторіччя в США. Виявилось, що при визначенні доз внесення вапна на різних ділянках поля, «відмінності між окремими ділянками досить суттєві, тому для правильного цільового використання ґрунту виникла потреба у побудові спеціальної карти внесення»[6].

© К.В. Васильковська, О.О. Андрієнко, В.О. Малаховська, 2023

Розвиток системи точного землеробства в різних країнах світу був обумовлений різними умовами. Так, в США, Канаді та Австралії, які мають значні сільськогосподарські угіддя, почали використовувати географічні інформаційні системи для системи точного землеробства раніше за інших. А в Європі розвиток ГІС починається тільки у 1997-1998 рр.

Інноваційні технології для сільськогосподарського виробництва, незважаючи на певні перепони, розвиваються досить потужно. Використання дронів у системі точного землеробства дає змогу робити знімки з висоти, створювати 3D-карти, слідкувати за ростом та розвитком рослин. Однак, якщо раніше дрони використовувались лише для інспекцій проблемних ділянок поля, то зараз сільськогосподарські дрони використовуються для внесення засобів захисту рослин, картографії та геодезії ділянок, обприскування та моніторингу росту вирощуваних культур [7].

В умовах сьогодення, під час повномасштабної війни з росією, саме інновації можуть допомогти аграрній галузі якщо не збільшити, то принаймні зберегти свій потенціал за рахунок більш ефективного використання доступних для сільськогосподарського використання територій. Таким чином, новітні підходи до можливості збільшення врожайності сільськогосподарських культур та покращення ефективності їх вирощування є необхідною умовою для збереження аграрного потенціалу, продовольчої безпеки та виживання країни.

Постановка завдання. Метою написання статті є аналіз ефективності сільськогосподарських дронів для механізованого обприскування посівів та їх порівняння із самохідними обприскувачами.

Виклад основного матеріалу. Використання дронів в сільськогосподарському виробництві останнім часом значно розширилось. Так, якщо раніше мова йшла тільки про моніторинг посівів, то зараз їх використання не обмежується оцінкою якості обробітку ґрунту чи якості отриманих сходів. Так, внесення технологічних матеріалів за допомогою дронів – є звичайною справою.

Отже, функції використання сільськогосподарських дронів такі:

По-перше, це збір інформації та аналітика. Сільськогосподарські дрони допомагають складати карти полів та робити їх замір. Під час вегетації за допомогою дронів відбувається моніторинг стану посівів. Можливе визначення густоти рослин, аналіз стану рослин, аналіз розповсюдження бур’янів та аналіз вологозабезпечення рослин. За допомогою отриманих даних розробляються карти індексів вегетації (NDVI).

По-друге, це внесення технологічних матеріалів. Сільськогосподарські дрони можуть використовуватись для внесення добрив та засобів захисту рослин (пестицидів, інсектицидів та гербіцидів, в тому числі десикантів), Однак, слід зазначити, що дронитакож можуть бути використані для біологічного захисту посівів – внесення трихограми для боротьби із шкідливими організмами[3].

Порівняння технологічного процесу обприскування наземними обприскувачами та сільськогосподарськими дронами дає змогу відмітити ряд недоліків щодо використання наземних обприскувачів:

1. Витоптування посівів. При роботі самохідного обприскувача наявні втрати врожаю, що спричинені витоптуванням[8].

2. Пошкодження рослин. Оскільки, максимальний кліренс у самохідного обприскувача складає 1,5–2,0 м, то його штанги можуть пошкоджувати верхівки рослин. Середній показник рослин, які гинуть в результаті взаємодії з елементами конструкції обприскувачів при їх роботі складає 3-5%.

3. Додаткове ущільнення ґрунту. При сучасному використанні, обприскувач проходить полем 2–10 разів протягом вегетаційного періоду, утворюючи колії в одному і тому ж місті, що призводить до переущільнення ґрунту. Як відомо, технологічну операцію із чизелювання рекомендується проводити раз на 4 роки. Отже, ущільнення ґрунту, утворене за один вегетаційний період, матиме негативний вплив на розвиток рослин щонайменше наступного року.

4. Відсутність можливості працювати одразу після дощу. Працювати одразу після дощу для наземної техніки неможливо. Однак, для сільськогосподарських дронів підвищена вологість ґрунту не є перешкодою.

5. Обробіток невеликої ділянки поля. Іноді виникає необхідність в локальному внесенні технологічних матеріалів. Як то: необхідність стимуляції ділянки рослин, які відстають в рості та розвиткові та потребують локального внесення добрив або стимуляторів росту. Також, іноді має місце поширення бур'янів на певній ділянці поля, шкідників або хвороб, що потребує внесення гербіцидів або пестицидів вїх осередках. Обробіток невеликої частини поля є досить складною задачею для самохідного обприскувача [8, 9].

Однак, на противагу недолікам, притаманним самохідним обприскувачам, слід зауважити, що вони існують і у сільськогосподарських дронів:

1. Навчання пілотів. Крім покупки самого дрона, необхідно провести навчання їх операторів (пілотів). Для повноцінної роботи, до складу екіпажу входить два оператори.

2. Додаткове обладнання. Для забезпечення безперервної роботи екіпажу, крім сільськогосподарського дрона, необхідно придбати змінні акумуляторні батареї, зарядну станцію, генератор та автотранспорт для перевезення обладнання та ємностей з водою.

Слід зазначити, що заміна батарей для поновлення роботи дрона, краще поєднувати із поповненням ємності для рідини. Це допоможе скоротити паузи під час роботи.

На полях з нелінійними контурами: складним рельєфом (нерівності, перешкоди), лінії електропередач, дерева та кущі, сільськогосподарські дрони будуть ефективніші.

Для оцінки ефективності використання сільськогосподарських дронів проведемо порівняльний аналіз. Для аналізу нами обрано два наземні самохідні обприскувачі та два дрони із ємністю для обприскування (табл. 1). При цьому, нами обрано найбільш використовувані в Україні моделі, як самохідних обприскувачів, так і сільськогосподарських дронів.

Порівнюючи обрані наземні обприскувачі, слід зазначити, що обидва самохідних агрегати мають схожу продуктивність – 18–20 га/год. Тому при аналізі роботи обприскувачів із однаковою продуктивністю, треба звернути увагу, перш за все, на об'єм ємності з робочою рідиною. Таким чином, ефективнішим виявився самохідний обприскувач New Holland, що має більший об'єм ємності – 5300 л. Однак слід зауважити, що за тієї ж продуктивності, самохідний обприскувач Tecnoma виконує менше проходів по полю, маючи більшу ширину захвату – 24 м.

При використанні самохідних агрегатів, слід звернути увагу на величину кліренсу, який може обмежувати виконання робіт самохідних обприскувачів. Величина технологічного зазору між рослинами та робочими органами надає можливість проводити обприскування під час всієї вегетації. Так, у обприскувача New Holland GUARDIAN 275F робочій кліренс дорівнює 183 см, а у обприскувача Tecnoma LASER4240 – 135 см. Отже, обприскувач із більшим кліренсом має більше

можливостей для виконання робіт, навіть із високорослими рослинами, такими як соняшник, ріпак та кукурудза.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики досліджуваних обприскувачів

Назва	Робоча швидкість, м/с	Ширина захоплення обприскування, м	Продуктивність, га/год.	Об'єм бака для робочого розчину, л	Питомі енерговитрати	Питомі енерговитрати, грн./га
Самохідний обприскувач New Holland GUARDIAN 275F	13,3	4,05	20	5300	0,50 л/га	25,0
Самохідний обприскувач Tecnoma LASER4240	6,1	24	18	4200	0,44 л/га	22,0
Безпілотний обприскувач LOVOL LJ16L-606	4-8	6	10	16	0,41 кВт/га	7,6
Сільськогосподарський дрон DJI AGRAS T30	7	9	16,2	30	0,31 кВт/га	5,7

Джерело:[10-13]

При порівнянні питомих витрат пального у обох обприскувачів, бачимо що вони відрізняються незначно: у обприскувача New Holland – 0,44 л/га, а у обприскувача Tecnoma – 0,5 л/га.

Порівнюючи технічні характеристики сільськогосподарських дронів, ширина обробітку у DJI AGRAS T30 складає 9 м, тоді як у LOVOL LJ16L-606 лише 6 м. Отже, перевагу за цим показником в 1,5 рази має обприскувач DJI AGRAS T30.

Продуктивність дрона DJI AGRAS T30 складає 16,2 га/год, тоді як у дрона LOVOL LJ16L-606 продуктивність дорівнює 10 га/год.

Наступним етапом аналізу є порівняння об'єму для робочого розчину в обох дронів. Як бачимо, перевагу має DJI AGRAS T30 – 30 л, тоді як у LOVOL LJ16L-606 – 16 л.

Ємності елементів живлення сільськогосподарських дронів обмежують їх енерговитрати. Дрон DJI AGRAS T30 має батарею ємністю у 29000 мА, а у дрона LOVOL LJ16L-606 ємність батареї – 22000 мА.

Реальна робоча ємність акумуляторних батарей складає 85% (k=0,85):

$$C_p = I \cdot k, \quad (1)$$

– для DJI AGRAS T30 – I_{p1}=18,7А/год;

– для LOVOL LJ16L-606 – I_{p2}=24,6 А/год.

Для забезпечення безперебійної роботи сільськогосподарських дронів у полі, купуються змінні батареї та зарядна станція. Час поновлення заряду для батареї дрона DJI AGRAS T30 складає близько 12 хвилин, а для дрона LOVOL LJ16L-606 – близько 40 хв. Більший час поновлення заряду вимагає більшої кількості елементів живлення.

Так, для безперебійної роботи одної години в полі сільськогосподарський дрон LOVOL LJ16L-606 потребує 5 елементів живлення, тоді як DJI AGRAS T30 – 4 батареї. Для зарядки елементів живлення обидва дрони комплектуються зарядною станцією та, за потреби, генератором.

Витрати струму дорівнюють:

$$I=C_p/\cdot t \quad (2)$$

– для DJI AGRAS T30 – I_1=93,5А;
– для LOVOL LJ16L-606 – I_1=98,4А.

Потужність дорівнює:

$$P=I\cdot U, \quad (3)$$

– для DJI AGRAS T30 –4,1 кВт;
– для LOVOL LJ16L-606 – 5,1кВт.

Тоді питома потужність дорівнює:

$$P'=P/W, \quad (4)$$

– для DJI AGRAS T30 – 0,41кВт/га;
– для LOVOL LJ16L-606 – 0,31кВт/га.

Єдиним можливим спільним знаменником для аналізу питомих енерговитрат самохідних та безпілотних агрегатів для обприскування є грошовий еквівалент цих витрат. Гривневі питомі енерговитрати самохідного обприскувача New Holland GUARDIAN 275F складають 25,0 грн/га, у самохідного обприскувача Tecnoma LASER4240 – 22,0 грн/га, у сільськогосподарського дрона LOVOL LJ16L-606 – 7,6 грн/га, у дрона DJI AGRAS T30 – 5,7 грн/га (рис. 1) [13].

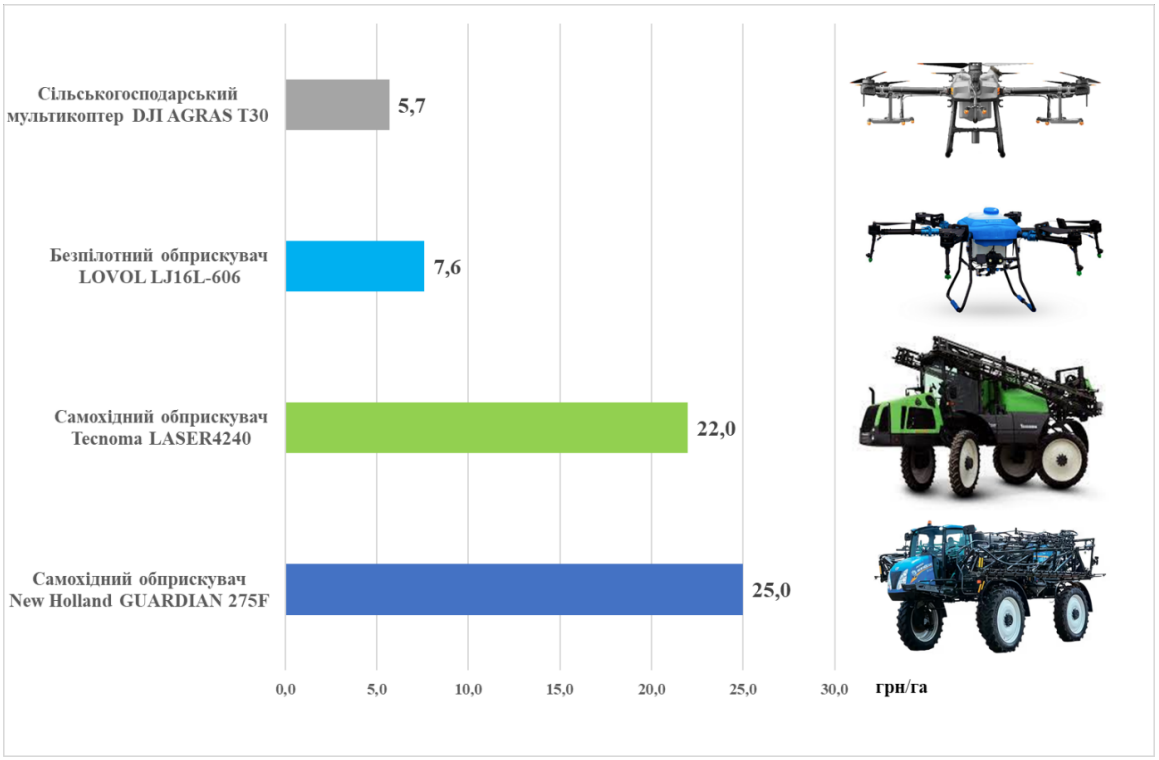


Рисунок 1 – Приведені питомі енерговитрати досліджуваних обприскувачів
Джерело: розроблено авторами із використанням [10-13]

Ринок дронів для сільського господарства в Україні ще достатньо молодий, однак, він стрімко розвивається. Компанії, які раніше виготовляли безпілотні літальні апарати виключно для потреб армії або фотовідеозйомки, звернули увагу і на потреби аграрного виробництва. Тому розвиток сегменту ринку сільськогосподарських дронів має багато чинників для подальшого росту. Дрони зайняли свою нішу в агровиробництві, як один із засобів технологічного забезпечення точного землеробства: для моніторингу посівів та їх обприскування.

Аналіз переваг і недоліків, в порівнянні із наземними обприскувачами, дає змогу стверджувати, що незабаром агродрони зможуть потіснити наземні обприскувачі. Адже, в умовах сьогодення, розвиток агродронів отримав новий потужний поштовх, як не прикро про це говорити, і технології, які наразі розробляються військовими для наближення нашої перемоги у війні з росією, після неї будуть втілені і в дронах для сільського господарства.

Висновки. Отже, використання сільськогосподарських дронів для системи точного землеробства в аграрному виробництві є не тільки сучасною технологією, яка надає можливість вносити технологічні матеріали під час всієї вегетації рослин, а й є більш екологічною та економічною, ніж при використанні самохідних обприскувачів.

Проведений аналіз ефективності самохідних та безпілотних агрегатів дав можливість порівняти питомі енерговитрати в гривневому еквіваленті. Так, для самохідного обприскувача New Holland GUARDIAN 275F цей показник дорівнює 25,0 грн/га, для Tecnoma LASER4240 – 22,0 грн/га, а для агродронів – 7,6 грн/га та 5,7 грн/га для LOVOL LJ16L-606 та DJI AGRAS T30 відповідно.

Список літератури

1. Аніскевич Л.В., Адамчук В.І. Технології точного землеробства. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2006. Вип. 101. С. 8-27.
2. Huisman O., Rolf A. Principles of Geographic Information Systems (GIS): an Introductory Textbook. Publisher: ITC Educational Textbook Series, The Netherlands, 2009. 540.
3. Васильковська К.В., Андрієнко О.О., Шепілова Т.П. Ефективність агродронів в системі точного землеробства. *Аграрні інновації*. 2023. Вип. 16. С. 13-18. DOI: https://doi.org/10.32848/agrar.innov. (дата звернення: 2023.17.2).
4. Діордієв В.Т., Кашкарьов А.О., Семендяєв О.Є. Проблеми використання дронів у задачах обприскування сільськогосподарських культур та шляхи їх вирішення. *Науковийвісник ТДАТУ*. 2019. Вип. 9, *Т. 1*. С. 1-10. DOI: https://doi.org/10.32848/10.31388/2220-8674-2019-1-45
5. Silver B., Mazur M., Wiśniewski A. and Babicz A. (2017). Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators: Communications Review. PwC. URL: https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf2 (date of application: 01.2023)
6. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., VoytiukV. Algorithms of Robotic Electrotechnical Complex Control in Agricultural Production. In Control Systems: Theory and Applications. River Publishers: Gistrup, Denmark, 2018. Pp. 271–289.
7. Смірнов Я. Про дрони сільськогосподарського призначення. 50 North GIS Blog from Ukraine. 28/08/2017. URL: http://www.50northspatial.org/ua/agricultural-drones/ (дата звернення: 30.01.2023)
8. Смірнов Я. Дрони в агробізнесі. 50 North GIS Blog from Ukraine. 28/08/2017. URL: http://www.50northspatial.org/ua/agriculture-business-drones/ (дата звернення: 02.02.2023)
9. Дрони у сільському господарстві, або як починалося точне землеробство. *Agravery*. URL: https://agravery.com/uk/posts/show/droni-u-silskomu-gospodarstvi-abo-ak-pocinalosa-tocne-zemlerobstvo (дата звернення: 12.07.2023)
10. Обприскувачі New Holland Defensor ефективно працюватимуть на всіх фазах вегетації. *AgroTimes*. URL: https://agrotimes.ua/tehnika/obpryskuvachi-new-holland-defensor-efektyvno-praczyuvatymut-na-vsih-fazah-vegetacziyi/ (дата звернення: 11.05.2023)
11. Обприскувач Tecnoma Laser. *Agroresurs*. URL: http://www.agro.kr.ua/uk/laser (дата звернення: 11.05.2023).
12. Технторг. Безпілотний обприскувач LOVOLLJ16L-606. URL: https://technotorg.com/catalogue/view/bespilotnyj-opryskivatel-lovol-lj16L606.html (дата звернення: 12.05.2023)
13. Кроптер. Комплект DJIAGRAS T30. URL: https://cropter.ua/dron_dji?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=prodazh-agrodroniv&gclid=CjwKCAiA0cyfBhBREiwAAtStHK4mHymCSGyOCep1XQ0oG8f2X1Zh4VamseFR3IfnjZYZI6D0tQrY7RoCeXUQAvD_BwE (дата звернення: 12.05.2023)
14. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Підручник дослідника : навч. посіб. для студ. агротехн. спец.. Харків : Мачулін, 2016. 204 с.

Referencis

1. Aniskevych, L.V. & Adamchuk, V.I. (2006). Tekhnolohii tochnoho zemlerobstva [Technologies of precision agriculture]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho ahrarnoho universytetu - Scientific Bulletin of the National Agrarian University, Issue 101*, 8-27 [in Ukrainian]
2. Huisman, O. & Rolf, A. (2009). Principles of Geographic Information Systems (GIS): an Introductory Textbook. Publisher : ITC Educational Textbook Series, The Netherlands [in English].
3. Vasylkovska, K.V., Andriienko, O.O. & Shepilova, T.P. (2023) Efektyvnist ahrodroniv v systemi tochnoho zemlerobstva [The effectiveness of agricultural drones in thesystem of precision agriculture]. *Ahrarni innovatsii-Agrarian innovations. – Kherson, Vol. 16,* Pp. 13-18. (DOI: https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.17.2) [in Ukrainian]
4. Diordiiev, V.T., Kashkarov, A.O. & Semendiaiev, O.Ie. (2019). Problems of using drones in the tasks of spraying agricultural crops and ways to solve them [Problemy vykorystannia droniv u zadachakh obpryskuvannia silskohospodarskykh kultur ta shliakhy yikh vyrishennia]. *Naukovy vivisnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific bulletin of Tavriyya State Agro-Technological University, 9(1),* Pp. 1-10. DOI: https://doi.org/10.32848/10.31388/2220-8674-2019-1-45. [in Ukrainian]
5. Silver, B., Mazur, M., Wiśniewski, A. & Babicz, A. (2017). Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators : Communications Review. PwC. Retrieved from https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf [in English].
6. Lysenko, V., Bolbot, I., Romasevych, Y., Loveykin, V. & Voytiuk,V. (2018). Algorithms of Robotic Electrotechnical Complex Control inAgricultural Production. In Control Systems: Theory and Applications. pp. 271-289 [in English].
7. Smirnov, Ya. (2017). Pro drony silskohospodarskoho pryznachennia [About agricultural drones]. 50 North GIS Blog from Ukraine. Retrieved from http://www.50northspatial.org/ua/agricultural-drones/ [in Ukrainian]
8. Smirnov, Ya. (2017). Drony v ahrobiznesi [Drones in agribusiness]. 50 North GIS Blog from Ukraine. Retrieved from http://www.50northspatial.org/ua/agriculture-business-drones/ [in Ukrainian]
9. Drony u silskomu hospodarstvi, abo yak pochynalosia tochne zemlerobstvo [Drones in agriculture, or how precision farming began]. Agravery. *agravery.com.* Retrieved from https://agravery.com/uk/posts/show/droni-u-silskomu-gospodarstvi-abo-ak-pocinalosa-tocne-zemlerobstvo [in Ukrainian]
10. Obpryskuvachi New Holland Defensor efektyvno pratsiuvatymut na vsikh fazakh vehetatsii [New Holland Defensor sprayers will work effectively in all phases of vegetation]. AgroTimes. *agrotimes.ua.* Retrieved from https://agrotimes.ua/tehnika/obpryskuvachi-new-holland-defensor-efektyvno-praczyuvatymut-na-vsih-fazah-vegetacziyi/ [in Ukrainian]
11. Obpryskuvach Tecnoma Laser [Tecnoma Lasersprayer]. Agroresurs. *agro.kr.ua.* Retrieved from http://www.agro.kr.ua/uk/laser 11.05.2023 [in Ukrainian]
12. Tekhnotorh. Bezpilotnyi obpryskuvach LOVOL LJ16L-606 [Unmanned sprayer LOVOL LJ16L-606] *technotorg.com.* Retrieved from https://technotorg.com/catalogue/view/bespilotnyj-opryskivatel-lovol-lj16L606.html 12.05.2023 [in Ukrainian]
13. Kropter. Komplekt DJI AGRAS T30 [Complete set DJI AGRAS T30]. *cropter.ua.* Retrieved from https://cropter.ua/dron_dji?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=prodazh-agrodroniv&gclid=CjwKCAiA0cyfBhBREiwAAtStHK4mHymCSGyOCep1XQ0oG8f2X1Zh4VamseFR3IfnjZYZI6D0tQrY7RoCeXUQAvD_BwE12.05.2023 [in Ukrainian]
14. Vasylkovskyi, O., Leshchenko, S., Vasylkovska, K. & Petrenko, D. (2016*). Pidruchnyk doslidnyka: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei* [*Researcher's textbook: Study guide for students of agrotechnical specialties*]. Kharkiv : Machulin [in Ukrainian]

Kateryna Vasylkovska, Assoc. Prof., PhD tech. sci.**, Olha Andriienko,** Assoc. Prof., PhD agrarn. sci.**, Valentyna Malakhovska**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of the Energy Efficiency of Agricultural Drones in the System of Precision Agriculture

The article provides a comparative analysis of the energy efficiency of ground sprayers and drones for agriculture. Today, agricultural drones are an integral part of the precision farming system, which combines soil tillage operations, sowing, fertilizing, application of chemicals and growth stimulants, and harvesting into a single technological line. The search for new technological solutions to increase the yield of agricultural crops is

a primary condition for the transition to a new level of management and the survival of the agricultural production industry in a difficult time for the country.

For a comparative analysis of energy efficiency, the most used models of self-propelled sprayers and agricultural drones in Ukraine were selected. The functional and technological capabilities of agricultural drones in comparison with ground sprayers are analyzed. A comparison of the technological process of spraying with self-propelled sprayers and agricultural drones revealed a number of advantages of unmanned aerial vehicles. The specific fuel consumption of both sprayers was determined, so the specific consumption of New Holland is equal to 0.44 l/ha, and that of Tecnoma is 0.5 l/ha. The specific energy consumption of agricultural drones was determined, so the specific energy consumption of the LOVOL LJ16L-606 is 0.41 kW/ha, and the DJI AGRAS T30 is 0.31 kW/ha. To compare the specific energy consumption of self-propelled and unmanned units in monetary terms, it was established that for the New Holland GUARDIAN 275F self-propelled sprayer this indicator is 25.0 UAH/ha, for the Tecnoma LASER4240 self-propelled sprayer it is 22.0 UAH/ha, and for agricultural drones it is 7 .6 UAH/ha and 5.7 UAH/ha for LOVOL LJ16L-606 and DJI AGRAS T30, respectively.

Therefore, the use of agricultural drones for the system of precision farming in agricultural production is not only a modern technology that provides the opportunity to apply technological materials during the entire growing season of plants, but is also more ecological and economical than when using self-propelled sprayers.

precision agriculture, geographic information system, agricultural drones, crop spraying, specific energy consumption, effectiveness

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК631.362 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148

С. П Степаненко, д- р техн. наук, ст. наук. співр., **Д. А. Волик,** мол. наук. співр.
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва, Національної академії аграрних наук України, Глеваха, Україна
e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною

Наведено результати математичного моделювання руху зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. Використана силова та кінематична модель, геометричні характеристики поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора в динаміці зкінематичними показники обробки. Розрахунки за запропонованою моделлю дозволяють визначати траєкторії переміщення, швидкості та прискорення насінин зернового середовища при сукупній дії на них вібрацій та пневмоімпульсного потоку.

В результаті проведених науковихдосліджень та аналізу створюваних сил за розробленою математичною моделлю встановлено: найбільший вплив на процес переміщення зернового матеріалу, як в горизонтальному так і у вертикальному напрямку надає сила імпульсу (пульсацій) повітряного потоку, сила тиску вище лежачих шарів зернового матеріалу (для насінин у середній частині та на поверхні безпровального решета), сили тертя, ваги насінини та архімедова сила. Тому з метою інтенсифікації процесу фракціонування зернового середовища, збільшення питомоїпродуктивності вібропневмоімпульсного сепаратора необхідно підвищити силу пульсуючого повітряного потоку, сили інерції коливального руху, тертя та бічний тиск на насінини в зерновому середовищі.

насіння, густина, питоме навантаження, диференціальні рівняння, швидкість переміщення насіння, експериментальні дослідження, макетний зразок

© С.П. Степаненко, Д.А. Волик, 2023

Постановка проблеми. Рух матеріалу у зернотранспортних системах на різних типах поверхонь (наприклад, на живильниках, лопатях у барабанах і мішалках, віброситах та обертових розкидачах) є загальнопоширеним явищем у техніці для подальшої обробки зерна після його збирання [1-2].

Основою теорії руху частинок по шорстких поверхнях є диференціальні рівняння для переміщення частинок, які діють під впливом сили тяжіння, сухого тертя та опору повітря (середовища)[3, 9, 13]. Тому при розробці нових конструкцій машин і обладнання для підвищення їх питомоїпродуктивності важливо мати математичні моделі, які належним чином описують процес переміщення зерна з урахуванням всіх активних сил в зерновому середовищі[4, 6-8].

Якість технологічних процесів, пов'язаних з транспортуванням зерна на опорних поверхнях, залежить від конструкційних параметрів і режимів роботи робочих органів, таких як швидкість переміщення матеріалу, тривалість контакту з поверхнею, швидкість руху та інші показники[10, 12, 18].

Неоднозначність у виборі математичних формул та механіко-математичних моделей, які враховують зовнішні та внутрішні сили та визначають коефіцієнт опору, ускладнює використання наявних аналітичнихзалежностей для розрахунку швидкості і шляху переміщення зерна в зерновому середовищі[5, 11, 17]. Використання коефіцієнта вітрильності як коефіцієнта опору та коефіцієнтадинамічноївязкості зернового середовища не є належно обґрунтованим. Тому для кожної математичної моделі руху частинки по поверхні необхідно визначати коефіцієнти в диференціальних рівняннях на основі експериментальних даних і оцінювати відповідність моделі реальному процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для отримання якісного врожаю з одночасним збільшенням валового надходження на зерноочисні комплекси та мінімізацією посівних норм насіння необхідно забезпечити висів сільськогосподарськими матеріалами - насінням, яке буде відповідати найвищим стандартам до фізико-механічних властивостей насіння. Для забезпечення даних властивостей посівного матеріалу, безперечно, необхідно виконання послідовних технологічних операцій, які пов’язані з попереднім очищенням та сушінням зібраного комбайном засміченого зернового матеріалу, провести його безпосереднє доочищення на комбінованих зерноочисних технічних засобах, трієрах та вібропневматичних сортувальних столах. Слід відмітити, що дослідження впливу на зернівку у вібропневмозрідженому шарі матеріалу з підведенням додаткових збурюючих сил, типу пульсуючого повітряного потоку в більшості випадків не проводиться, а ті дослідження які проведені авторами [3-4], щодо впливу на зернове середовище обмежуються досить значними припущеннями, які не відображають реальність перебігу процесу вібропневмозрідження шару зернового матеріалу [9, 12, 13]. Основними недоліками, які слід відмітити, для використання даних технічних засобів є потреба у висококваліфікованих працівниках для раціонального налаштування досить складних за своєю будовою машин (вібростолів, вібропневматичних столів, вібровневмосепараторів тощо), значна питома енергоємність даних технічних засобів у порівнянні з більш простими для використання решітними та пневморешітними технічними засобами та трієрами.

Дослідженнями тамодернізацією конструкційвібропневмосортувальних столів займалося значна кількість відомих вчених [1, 8-10, 13, 17, 18], як в Україні, так і за кордоном [14]. Нижче у таблиця 1 наведено перелік існуючих технічних засобів та їхтехнологічні і енергетичні характеристики. Аналіз даних характеристик, щодо продуктивності вібропневмостоліввітчизняного виробництва становить від 1,0 до 6,0

т/год, питоме навантаження на деку (безпровальне решето) коливається в межах 0,83–3,20 т/год·м^2, їхня питома енергоємність становить1,83–4,75 кВт.год/т. Машини фірми «Cimbria» (Данія)мають питоме навантаженнях на деку 2,63–3,53 т/год*м^{2}та питому енергоємність у межах 1,79–5,50 кВт.год/т, слід відмітити що для даних технічних засобів з продуктивністю до 1,5 т/год цей показник становить 5,50 кВт. год/т

Пневмостоли фірми «Петкус» (Німеччина) з продуктивністю 1,5 т/год маютьпитоме навантаження на деку 0,64 т/год*м^2, а їх питома енергоємність становить 5,5 кВт/год.

На базі проведеного короткого аналізу технічних засобів для поділу насіннєвого матеріалу за густиною зернівок, або комплексом фізико-механічних властивостей постає питання, щодо модернізації існуючих і розроблення нових машин, які забезпечать розділення насіннєвого матеріалу за комплексом властивостей, у тому числі, густиною, з одночасним зменшенням питомої енергоємності, за незмінних умов показників якості розділення, тому вирішення даної проблеми є досить актуальним та своєчасним.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування параметрів і режимів процесу поділу насіння пшениці за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі на технічному засобі з вдосконаленою конструкцією.

Виклад основного матеріалу. Аналітичні дослідження процесуподілу насіння пшениці за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі проведені з використанням методів динаміки і класичної механіки, а лабораторні дослідження виконані на установці для поділу насіння за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі, яка розроблена у відділі механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур ІМА АПВ [5, 17] з використанням методик однофакторного та багатофакторного експерименту. В якості насіння основної культури використовували насіння пшениці врожаю 2022 року за наступних значень: вологи 12,8% вихідного матеріалу, що пройшов попереднє очищення, основне очищення на повморешітній машині, та має об'ємну масу 656 г/дм^3 – для важких насінин та об'ємну масу 450 г/дм^3 – для відносно легких насінин.

Поставлені завдання вирішували проведенням 1-но та 2-факторного експерименту. В процесі лабораторних досліджень змінювали частоту коливань деки, кут її нахилу до горизонту та частоту пульсацій повітряного потоку, яке подавалось під деку (безпровальне решето). При проведенні лабораторних досліджень налаштовували значення подачі зернового матеріалу в межах 750–850 кг/год, а також використовували наступне лабораторне обладнання: термогігроанемометрдля визначення швидкості повітряного потоку над поверхнею декив межах 0–3.6 м/с, частотний регулятор - для зміни частоти коливань деки в діапазоні 3–10Гц і кутомір - для встановлення кута нахилу деки. Функцією оптимізації роботи технічного засобу обрали: ступінь розділення насіння за густиною та втрати насіння (тобто потрапляння насінин з більшою (меншою) їх густиною у відбірники I, II фракцій).

На насінину у зерновому середовищі, яка рухається по поверхні безпровального решета з поздовжнім кутом нахилу, під дією її коливань і пульсуючого повітряного потоку діють сили, які представлені на рис. 1 і 2.

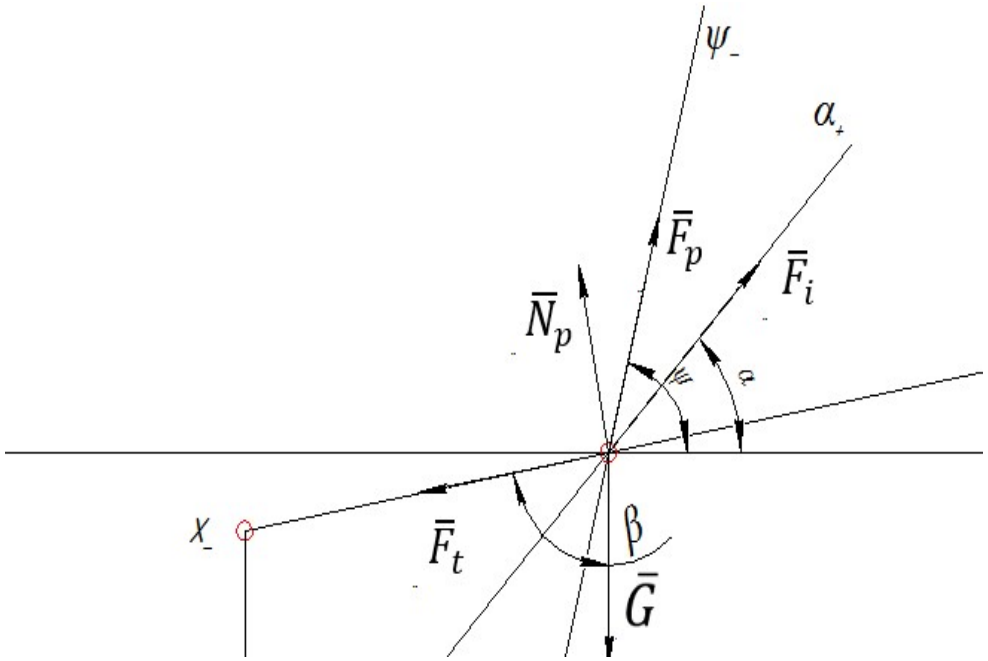


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на насінину зернового середовища, яка рухається по поверхні безпровального решета (рух співпадає з напрямом сили інерції)

Джерело: розроблено авторами

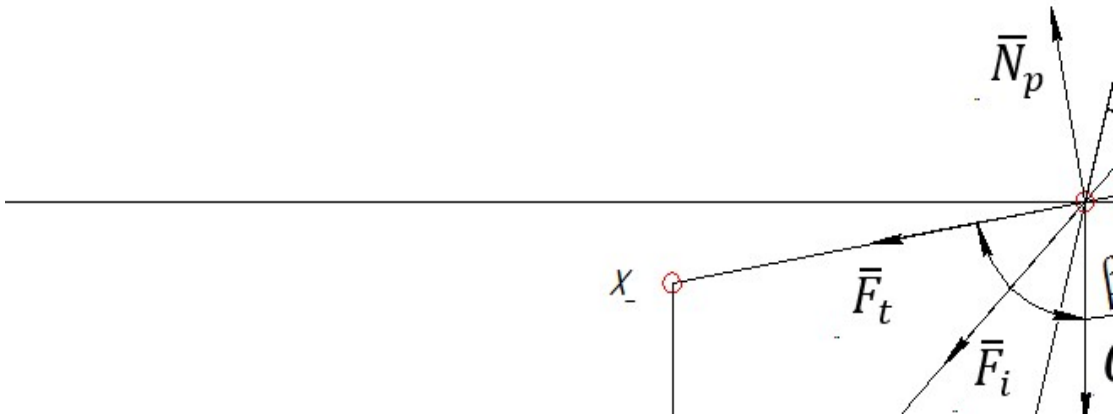


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на насінину зернового середовища, яка рухається на поверхні безпровального решета (рух протилежний з напрямом сили інерції)

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до рис. 1. та рис. 2 диференціальні рівняння руху насінини для різних інтервалів набудуть наступного вигляду:

$$m \cdot \frac{d^2 x_{(+)}}{dt^2} = F_i \cdot \cos(\alpha - \beta) - m \cdot g \cdot \sin(\beta) - F_t + F_p \cdot \cos(\psi - \beta) \quad (1)$$

де m –масанасінини;
$\frac{d^2x}{dt^2}$ – прискорення;
F_i – сила інерції;
α – кут спрямованості коливань;
β – кут нахилу поверхні деки;
γ – кут тертя матеріалу по поверхні деки;
g – прискорення вільного падіння;
F_p– сила опору повітряного потоку;
ψ – кут спрямованості повітряного потоку;
N_p – сила, що діє перпендикулярно поверхні деки (реакція опори);
F_t – сила тертя.

Після нескладних математичних перетворень рівняння (1), отримаємо:

$$\frac{d^2x_{(+)}}{dt^2}\cdot\frac{\cos(\gamma)}{\cos(\alpha-\beta-\gamma)}=\omega^2\cdot R\cdot\cos(\omega\cdot t)-g\cdot\frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos(\alpha-\beta-\gamma)}+$$
$$+k\cdot V_{pn}\cdot 1-\sin t\cdot\cos\beta$$

(2)

де k_p–коефіцієнт вітрильності, м$^{-1}$, [3, 5];
- швидкість витаннянасінняпшениці, м/с;
$S_м=\frac{\pi d^2}{4}$ – площаміделевогоперетинузернівки;
$d=2\cdot r$ – діаметр кульової зернівки, м;
ρ – густина повітря, кг/м^3;
$\xi(Re)$ – коефіцієнтаеродинамічного опору, який залежить від критерія Рейнольдса $Re=\frac{du}{\nu}$ [1];
ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості, м^2/с;
u – швидкість обтікання частинки, м/с;
V_{pn} –швидкість повітряного потоку, м/с;
ω – частота коливань безпровального решета, Гц;
ω_1 – частота коливань пульсуючого повітряного потоку, Гц;
R – радіус кривошипа, м.

$$m\cdot\frac{d^2x_{(-)}}{dt^2}=F_t-F_i\cdot\cos(\alpha-\beta)-m\cdot g\cdot\sin(\beta)+F_p\cdot\cos(\psi-\beta)$$

(3)

Після відповідних перетворень, рівняння (3) набуде наступного вигляду:

$$+k \cdot V_{pn} \cdot 1 - \sin \cdot t \qquad \cos \beta$$

$$\frac{d^2x_{(-)}}{dt^2} \cdot \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\alpha-\beta+\gamma)} = \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta-\gamma)}{\cos(\alpha-\beta+\gamma)} +$$

Введемо позначення:

$$\lambda = \frac{\cos(\alpha-\beta+\gamma)}{\cos(\gamma)} \tag{5}$$

$$\xi = \frac{\cos(\alpha-\beta-\gamma)}{\cos(\gamma)} \tag{6}$$

Тоді значення рівнянь (2) та (4) з відповідним урахуванням виразів (5) та (6) набудуть наступного вигляду:

$$\rightarrow \quad \frac{d^2x_{(+)}}{dt^2} \cdot \frac{1}{\xi} = \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos(\alpha-\beta-\gamma)} +$$

$$+k \cdot V_{pn} \cdot 1 \quad \sin \quad t \qquad \cdot \cos \quad \beta$$

(7)

$$\rightarrow \quad \frac{d^2x_{(-)}}{dt^2} \cdot \frac{1}{\lambda} = \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta+\gamma)}{\cos(\alpha-\beta-\gamma)} - \rightarrow$$

$$\rightarrow \quad -k_p \cdot \left(V_{pn} \cdot [1 - \sin(\omega_1 \cdot t)]\right)^2 \cdot \cos(\psi-\beta) \tag{8}$$

Проінтегрувавши рівняння (7) і (8) та отримавши рівняння переміщення руху насінини по поверхні безпровального решета, яка піддається пульсуючому повітряному потоку, можливо встановити значення величини переміщення та швидкості насінин V_s по поверхні:

$$\rightarrow \quad V_s = \frac{x_{(+)} + x_{(-)}}{T} \tag{9}$$

де $x_{(+)}, x_{(-)}$ – переміщення насінин матеріалу зернового середовища, відповідно, вгору та вниз за період T коливань.

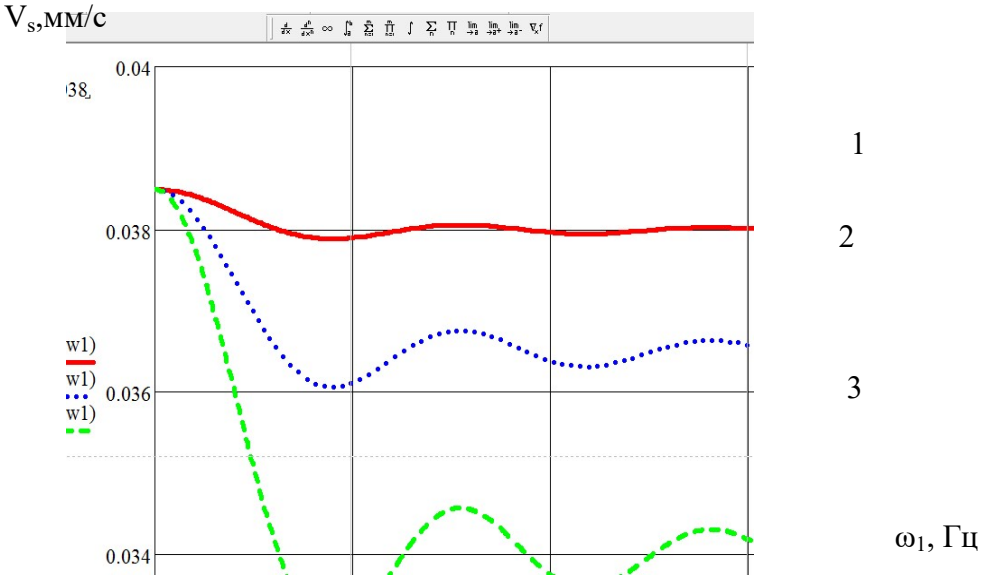
Розрахунки проводили за наступних початкових умов: кут нахилу поверхні деки $\beta = 10^\circ; 12^\circ; 14^\circ; 16^\circ;$ та $\alpha = 12^\circ; 14^\circ; 16^\circ; 18^\circ$; кут тертя насінинна поверхні деки $\gamma = 30^\circ$; радіус кривошипу $R = 0{,}005$ м; коефіцієнт вітрильності насінин, швидкості повітряного потоку $V_{pn} = 0 - 3{,}6$ м/с, частоті коливань деки $\omega = 10 - 20$ Гц; частоті пульсацій повітряного потоку $\omega_1 = 10 - 20$ Гц (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розрахункові величини середніх швидкостей руху насінин по безпровальній поверхні деки

V_{pn}, м/с	V_s, мм/с	$x_{(+)}$, мм	$x_{(-)}$, мм	β	ψ	α	γ	ω	ω_1
0	29	0.07	2.7	10	0	12	30	10	10
1,2	29	0.2231	2.636		15				
2,4	29	0.87	2.014		30				
3,6	29	2.194	0.742		45				
0	18	0.022	0.857	12	0	14		20	15
1,2	18	0.1514	0.7333		15				
2,4	18	0.72	0.18		30				
3,6	18	1.9	-0.96		45				
0	24	0.038	1.429	14	0	16		15	20
1,2	25	0.159	1.312		15				
2,4	25	0.07161	0.07776		30				
3,6	26	1.893	-0.03528		45				
0	19	0.0246	0.908	16	0	18		20	20
1,2	19	0.1384	0.7981		15				
2,4	19	0.6789	0.279		30				
3,6	20	1.8	-0.8382		45				

Джерело: розроблено авторами

Графічні залежності зміни середніх значень швидкостей насінин від частоти коливань поверхні та частоти пульсацій повітряного потоку наведені на рис. 3.



1 - Середня швидкість при швидкості повітряного потоку V_{pn}=1.2 м/с
2 - Середня швидкість при швидкості повітряного потоку V_{pn}=2.4 м/с
3 - Середня швидкість при швидкості повітряного потоку V_{pn}=3.6 м/с

Рисунок 3 – Закономірності зміни середніх значень швидкостей насінин на деці, залежно від частоти коливань поверхні декипри різних значеннях швидкості вхідного повітряного потоку V_{pn}

Джерело: розроблено авторами

З аналізу графічних залежностей, наведених на рис. 3 встановлено, що швидкість руху насінини по деці збільшується з підвищенням частоти коливань деки та частоти пульсацій повітряного потоку у вказаному інтервалі.

В результаті проведення лабораторних досліджень згідно з матрицею, яка наведена в таблиці 2, встановлені середні значення ступеня поділу насіння пшениці за їх густиною і втрат повноцінного насіння основної культури у відходи.

Таблиця 2 –Матриця експерименту, рівні варіювання факторівта результати лабораторних досліджень

№ досліду	Фактори		Середнє значення ступеня поділу насіння пшениці, Y_1 %
	Частота коливань деки, x_1 Гц	Частота пульсації повітряного потоку, x_2,Гц	
1	10	10	68,6
2	15	10	77,1
3	20	10	80,0
4	10	15	82,9
5	15	15	85,7
6	20	15	88,6
7	10	20	77,1
8	15	20	82,9
9	20	20	85,7

Джерело: розроблено авторами

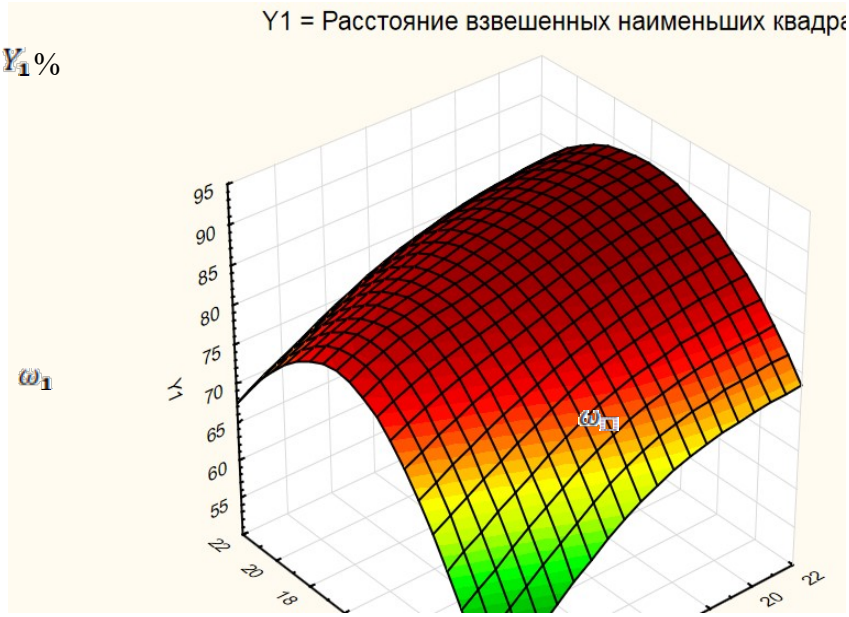


Рисунок 4 – Вплив частоти коливань деки ω та частоти пульсації ω_1 повітряного потоку на ступінь поділу насіння пшениці

Джерело: розроблено авторами

Після обробки отриманих лабораторних даних отримали рівняння регресії:

$$Y_1 = 87{,}47 + 5{,}32 \cdot x_1 + 2{,}88 \cdot x_2 - 1{,}66 \cdot x_1^2 - 0{,}54 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6{,}67 \cdot x_2^2 \quad (10)$$

На рис. 4 наведено вплив частоти коливань деки та кута її нахилу на ступінь поділу насіння пшениці.

З отриманих графічних залежностей можна зробити висновок про те, що раціональними параметрами і режимами процесу поділу насіння пшениці є:значеннячастотиколивань деки18-20 Гц, частота пульсаціїповітряного потоку–14-16 Гц.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлені раціональні значення параметрів технічного засобу для поділу насіння пшениці за їх густиною у вібропневмоімпульсному шарі зернового середовища: значеннячастотиколивань деки1820Гц, частота пульсаціїповітряного потоку –1416 Гц.

За визначених раціональних значень конструкційно-кінематичних параметрів технічного засобу для поділу насіння за густиною, максимальне середнє значення ступеня поділу насіння пшениці збільшується на 2025%.

Список літератури

1. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів : монографія. Київ : ЦП Компринт, 2023. 427 с.
2. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. № 50. С. 122–123.
3. Ребот Д. П., Топільницький В. Г. Математична модель руху сипкого матеріалу у вібраційному сепараторі. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2022. № 56. С. 67–74.
4. Ребот Д. П., Топільницький В. Г. Математичне моделювання взаємовпливу динамічних характеристик сипкої сировини у процесі вібраційної сепарації. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 2. С. 88–92. https://doi.org/10.36930/40310214
5. Степаненко С. П., Котов Б. І., Калініченко Р. А. Дослідження руху частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі за умов дії пульсацій повітряного потоку. *Сільськогосподарські машини*. 2021. № 47. С. 25–36. https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619
6. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH / A. Nesterenko et al. *Agricultural Engineering*. 2017. No. 53(3). P. 65–70.
7. Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops / Y. Mykhailov et al. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 147–156. https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012
8. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders / I. Rogovskii et al. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*. 2020. Vol. 13(62), no. 1. P. 117–128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11
9. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators / L. Tishchenko et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, no. 7(80). P. 63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920
10. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface / E. Aliiev et al. *Acta Periodica Technologica*. 2019. No. 50. P. 12–22. https://doi.org/10.2298/apt1950012a
11. Improving the efficiency of harvesting sunflower seed crops / S. Stepanenko et al. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2022. P. 331–340. https://doi.org/10.35633/inmateh-67-34
12. Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density / V. Bredykhin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, no. 1(112). P. 54–60. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938
13. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 4383. https://doi.org/10.3390/app11104383

14. Reguła T., Frączek J., Fitas J. A Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid. *Processes*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 5. https://doi.org/10.3390/pr9010005
15. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel / S. Stepanenko et al. *Journal Of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 225–235. https://doi.org/10.5513/jcea01/24.1.3732
16. Theoretical studies of the process of grain material movement on the surface of the stepped vibrating feeder / S. Stepanenko et al. *2(105)*. 2022. No. 2(105). P. 25–32. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-2-3
17. Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow / V. Adamchuk et al. *In Engineering for Rural Development*. No. 20. P. 657–664.
18. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine / V. Adamchuk et al. *Rural Sustainability Research*. 2021. Vol. 46, no. 341. P. 116–124. https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023

References

1. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2023). Basics of the theory and technology of air separation of grain materials. Kyiv: TsP Komprynt. [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2020). The main theoretical principles of the separation of grain material in air ducts with non-uniform air flow speed. *Design, production and operation of agricultural machines*, (50), 122–123. [in Ukrainian].
3. Rebot, D. P., & Topilnytskyi, V. H. (2022). Mathematical model of movement of loose material in a vibrating separator. *Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering*. (56), 67–74. [in Ukrainian].
4. Rebot, D. P., & Topilnytskyi, V. H. (2021). Mathematical modeling of the interaction of dynamic characteristics of loose raw materials in the process of vibration separation. *Scientific Bulletin of UNFU*.31 (2), 88-92. [in Ukrainian].
5. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Kalinichenko, R. A. (2021). Study of the movement of grain material particles in a vertical channel under the conditions of air flow pulsations. *Agricultural machinery.*, (47), 25–36. http://dx.doi.org/10.36910/acm.vi47.619 [in Ukrainian].
6. Nesterenko, A., Leshchenko, S., Vasylkovskyi, O., & Petrenko, D. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH. *Agricultural Engineering*, (53(3)), 65–70. [in English].
7. Mykhailov, Y., Zadosna, N., Postnikova, M., Pedchenko, G., Khmelovskyi, V., Bondar, M., ... Tomaszewska-Górecka, W. (2021). Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops. *Agricultural Engineering*, *25*(1), 147–156. http://dx.doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012 [in English].
8. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O., & Stepanenko, S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, *13(62)*(1), 117–128. http://dx.doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11 [in English].
9. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V., & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *2*(7(80)), 63. http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920 [in English].
10. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, (50), 12–22. http://dx.doi.org/10.2298/apt1950012a [in English]
11. Stepanenko, S., Aneliak, M., Kuzmych, A., Kustov, S., & Lysaniuk, V. (2022). Improving the efficiency of harvesting sunflower seed crops. *INMATEH Agricultural Engineering*, 331–340. http://dx.doi.org/10.35633/inmateh-67-34 [in English].
12. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., & Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *4*(1(112)), 54–60. http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938 [in English].
13. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduev, M., Miernik, A. Et al. (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Applied Sciences*, *11*(10), 4383. http://dx.doi.org/10.3390/app11104383 [in English].

14. Reguła, T., Frączek, J., & Fitas, J. (2020). A Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid. *Processes*, *9*(1), 5. http://dx.doi.org/10.3390/pr9010005 [in English].
15. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R., & Hryshchenko, V. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal Of Central European Agriculture*, *24*(1), 225–235. http://dx.doi.org/10.5513/jcea01/24.1.3732 [in English].
16. Stepanenko, S., Kotov, B., Rud, A., & Zamrii, M. (2022). Theoretical studies of the process of grain material movement on the surface of the stepped vibrating feeder. *2(105)*, 25–32. http://dx.doi.org/10.37128/2306-8744-2022-2-3 [in English].
17. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Ivanovs, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Y. (b. d.). Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. *In Engineering for Rural Development, (20),* 657–664. [in English].
18. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Gadzalo, I., Ivanovs, S., Stepanenko, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Y. (2021). Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine. *Rural Sustainability Research, 46(341),* 116–124. http://dx.doi.org/10.2478/plua-2021-0023 [in English].

Serhii Stepanenko, D.Sc., Senior Researcher, **Daryna Volyk,** Junior Research Fellow
Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine

Mathematical Modeling and the Results of Experimental Research of the Process of Density-Based Seed Separation Using Vibro-Pneumatic-Impulse Technology

The results of the mathematical simulation of the movement of grain material on the surface of the perforated deck of the vibro-pneumatic-impulse separator have been presented. Both force and kinematic models were employed, considering the geometric characteristics of the perforated deck surface in dynamic interaction with the kinematic indicators of processing. The calculations based on the proposed model allow for determining the trajectories of movement, velocities, and accelerations of the grain seeds within the grain medium under the combined action of vibrations and the pneumatic-impulse flow.

As a result of the scientific research and analysis of the forces created according to the developed mathematical model, it has been established that the most significant influence on the process of grain material movement, both in the horizontal and vertical directions, is exerted by the impulse force (pulsations) of the air flow, the pressure force of the underlying layers of the grain medium (for seeds in the middle part and on the surface of the perforated deck), frictional forces, the weight of the seeds, and the Archimedean force. Therefore, in order to intensify the process of fractionation of the grain medium and increase the specific productivity of the vibro-pneumatic-impulse separator, it is necessary to increase the force of the pulsating air flow, the force of inertia of the oscillatory motion, friction, and lateral pressure on the seeds within the grain medium.

seeds, density, specific load, differential equations, seed displacement velocity, experimental research, prototype

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.3 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.149-157

В.Ф. Дідух, проф., д-р техн. наук, **І.Є. Цизь,** доц., канд. техн. наук, **В.В. Тарасюк,** канд. техн. наук, **С.М. Хомич,** доц., канд. техн. наук
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна
e-mail: igor-71@ukr.net

Дослідження процесу формування у ґрунті вологоутримуючого шару

У статті наведені дослідження закономірності перерозподілу вологи від органічних добрив підвищеної вологості до шарів ґрунту для формування вологоутримуючого шару під час вирощування сільськогосподарських культур.

Результати вказують на доцільність використання сапропелю природної вологості для формування поживного шару на піщаному ґрунті. З метою механізованого внесення сапропель доцільно змішувати із доступними органічними наповнювачами. Впровадження способу вирощування сільськогосподарських культур з широкорядним способом посіву, який передбачає створення у ґрунті смуг із органічних добрив підвищеної вологості може бути реалізований на основі модернізованого розкидача органічних добрив.

вологоутримуючий шар, ґрунту, органічні добрива, сапропель, наповнювач, посів

Постановка проблеми. Висока продуктивність сучасного аграрного виробництва України забезпечується у більшості випадків шляхом внесення підвищених доз мінеральних добрив [1]. І практично зовсім не вносяться органічні добрива. У наслідок цього порушується рівновага і саморегуляція накопичення і перетворення органічних сполук, тобто процеси розкладання (мінералізації) починають переважати над процесами гуміфікації. Має місце явище, так званої, дегуміфікації, внаслідок якого послаблюються відтворювальні властивості, протиерозійна стійкість та протидія хіміко-техногенному впливу [2-4].

Окрім того, на сьогодні, одержання високих врожаїв сільськогосподарських культур значною мірою лімітується кліматичними змінами загалом і катастрофічним зниженням запасів вологи у ґрунтах, зокрема.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Альтернативою відсутнього ресурсу органічних добрив тваринного походження уже протягом багатьох років науковці вважають сапропель. Аналіз відомих досліджень вказує, що вплив сапропелю на родючість ґрунту є значним та комплексним, оскільки він є екологічно чистою органо-мінеральною сировиною, яка вдосконалює та покращує структуру ґрунту, а також є якісним джерелом поповнення гумусу [5, 6]. Завдяки вмісту у складі органічного сапропелю гумінових речовин, що відзначаються радіопротекторними, акумулятивними, транспортними, регулювальними та фізіологічними властивостями, сапропелі рекомендовані до застосування на екологічно чистих та радіаційно-забруднених територіях [5, 7, 8]. Потенціал сапропелів, як альтернативного джерела органічної речовини для збереження та відтворення родючості ґрунтів загалом по Україні становить 140 млн. т (у перерахунку на 60% вологості) [7].

У той же час слід звернути увагу на високий вологовміст щойно добутого сапропелю, який коливається для органічного його типу у межах 92–98 % [7].

© В.Ф. Дідух, І.Є. Цизь, В.В. Тарасюк, С.М. Хомич, 2023

Загальноприйняті технології подальшого використання сапропелю передбачають його зневоднення до вологості 60% [10]. Внесення сапропелю природної вологості на полях, які знаходяться на віддалі до 20 км від місця його добування, окрім відсутності витрат на зневоднення, забезпечує ще й формування у ґрунті додаткового запасу вологи. Очевидно, що досягнення ефекту можливе за локального внесення сапропелю, особливо під час внесення під культури із широкорядним способом посадки (посіву).

Кліматичні зміни, енергетична криза та процеси деградації ґрунтів змушують аграріїв відходити від класичних систем землеробства та впроваджувати енерго- та ресурсозберігаючих систем: Mini-till, No-till, Strip-till, Verti-till[10, 11, 12]. Серед вказаних все більшого поширення набуває вирощування сільськогосподарських культур за технологією Strip-till, яка передбачає заміну рядкового способу на смуговий посів із шириною міжряддя 45 см. Такі тенденції відкривають шлях до локального внесення сапропелю і під культури з рядковим способом посіву. Особливо актуальним дане рішення є для ґрунтів легкого механічного складу, які безпосередньо примикають до родовищ сапропелю.

Постановка завдання. На основі дослідження закономірності перерозподілу вологи від органічних добрив підвищеної вологості до шарів ґрунту, встановити можливість формування вологоутримуючого шару для вирощування сільськогосподарських культур.

Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментального дослідження впливу органічних добрив підвищеної вологості на розподіл вологи у шарах ґрунту використовували пластикові ємкості, у які пошарово закладались ґрунт, органічні добрива підвищеної вологості та знову ґрунт. Товщина кожного шару складала 50 мм. Таким чином у ємкості формувався нижній і верхній шар із ґрунту та середній шар – органічні добрива У якості органічних добрив використовували двокомпонентну суміш органічного сапропелю природної вологості W=92 % із органічним наповнювачем (рис.1) відповідно до варіантів досліду наведених у табл. 1. В усіх варіантах досліду співвідношення за вагою між сапропелем та органічним наповнювачам складало 8:1. Таке співвідношення забезпечує набуття сумішшю механічних властивостей, які дозволяють забезпечити його механізоване внесення робочими органами існуючих машин для внесення твердих органічних добрив.



а б в

а - сапропель + січка соломи пшениці; б - сапропель + деревна тирса; в - сапропель + січка соломи льону

Рисунок 1 – Фото варіантів органічних добрив

Джерело: розроблено авторами

Кожен із шести варіантів досліду закладався у трикратній повторюваності, що забезпечило формування 18 дослідних зразків (рис. 2).

Далі, у процесі реалізації експерименту, проводили вимірювання вологості кожного із трьох сформованих у ємкості шарів за допомогою електронного вологоміра ґрунту МГ-44 (рис. 3) Для контролю величини усадки шарів, на бічну поверхню ємкостей було наклеєно міліметрову шкалу. Вимірювання проводили із періодичністю 7-10 діб. Експеримент було закладено 28.02.2023 р.

Таблиця 1 – Варіанти складу суміші органічного добрива та ґрунту за дослідами

Варіант досліду	Органічне добриво		Ґрунт	
	склад (8:1)	вологість, %	механічний склад	Вологість, %
1	сапропель + січка соломи пшениці	87,6	супіщаний	11,9
2	сапропель + січка соломи пшениці	87,6	глинистий	18,5
3	сапропель + деревна тирса	80,0	супіщаний	11,9
4	сапропель + деревна тирса	80,0	глинистий	18,5
5	сапропель + січка соломи льону	83,3	супіщаний	11,9
6	сапропель + січка соломи льону	83,3	глинистий	18,5

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Фото досліджуваних зразків на початку експерименту

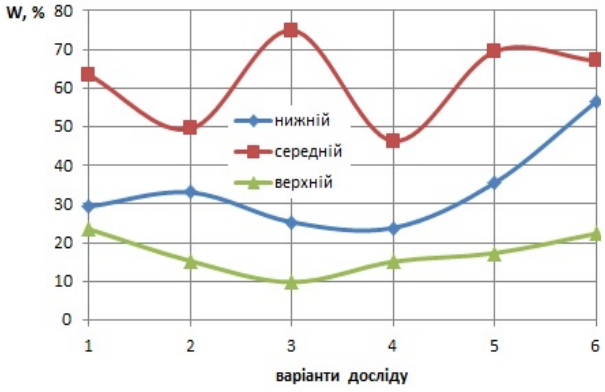
Джерело: розроблено авторами



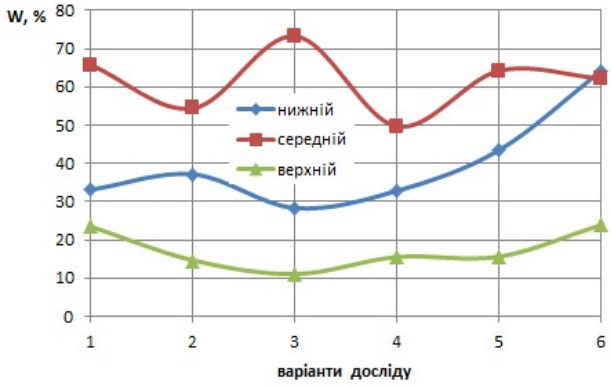
Рисунок 3 – Фото вимірювання вологості середнього шару досліджуваного зразка

Джерело: розроблено авторами

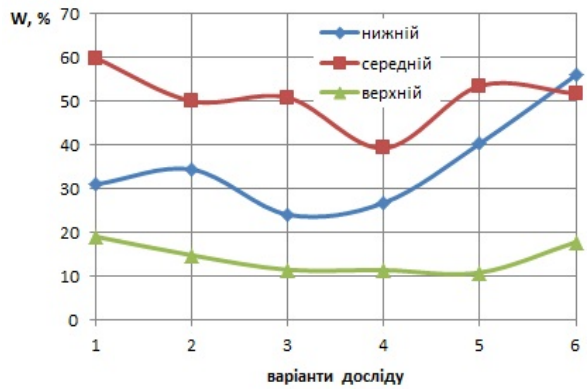
За середніми значеннями виміряної у процесі експерименту вологості шарів досліджуваних зразків побудовані графічні залежності (рис. 4).



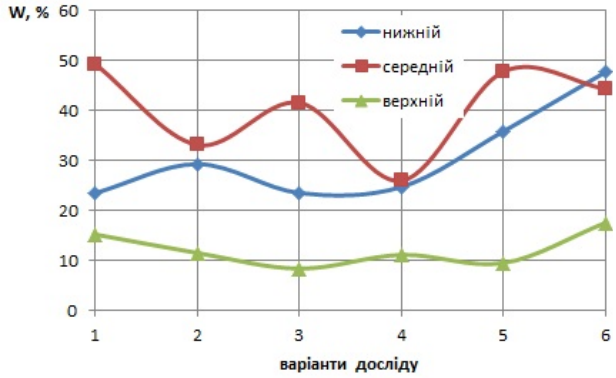
а



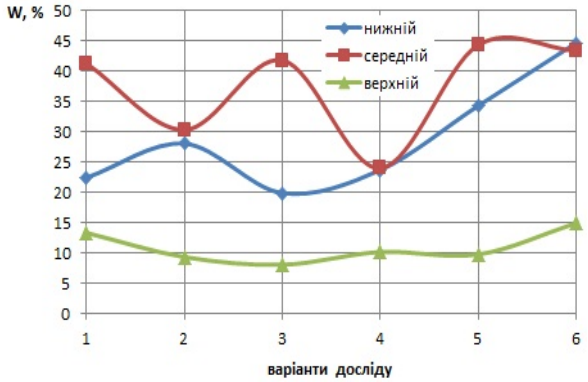
б



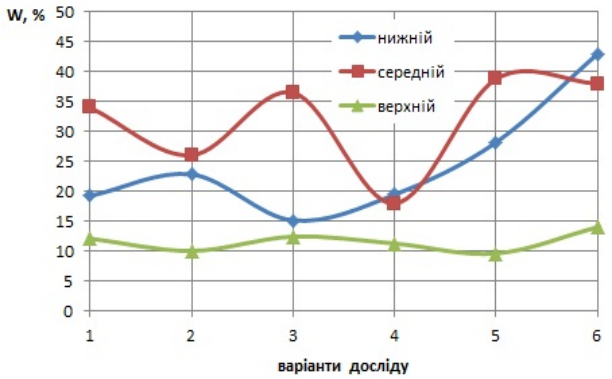
в



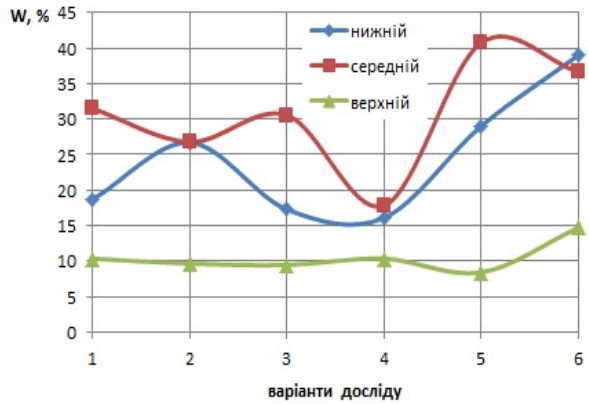
г



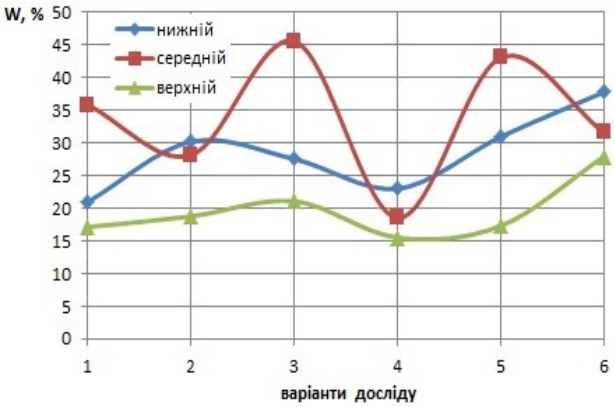
д



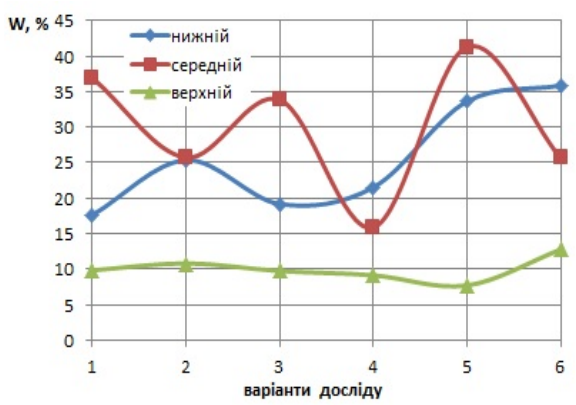
е



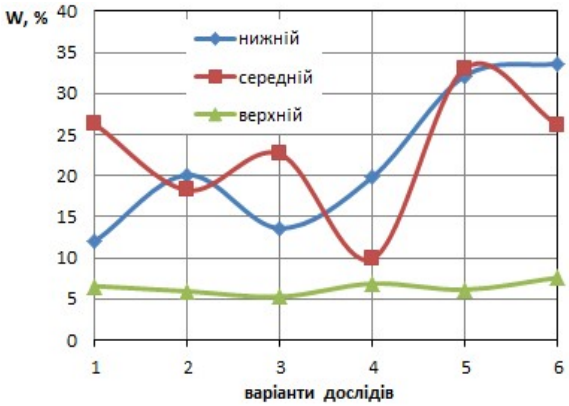
є



ж



з



и

а – 8.03; б -14.03; в – 23.03; г – 30.03; д – 6.04; е – 15.04; є – 21.04; ж – 5.05; з -13.05; и – 23.05

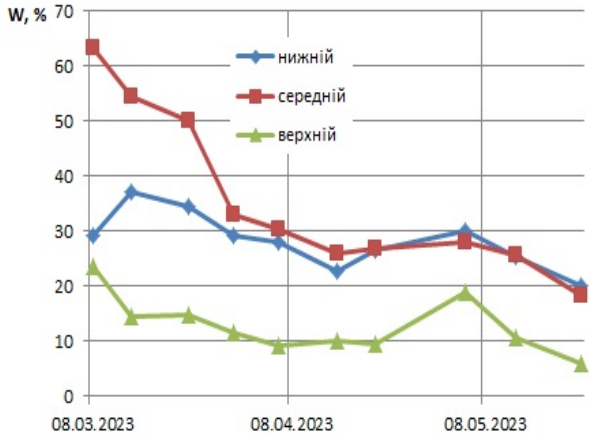
Рисунок 4 – Графічні залежності зміни вологості шарів досліджуваних зразків ґрунту та органічних добрив за варіантами досліду (див табл. 1) та датами вимірювання

Джерело: розроблено авторами

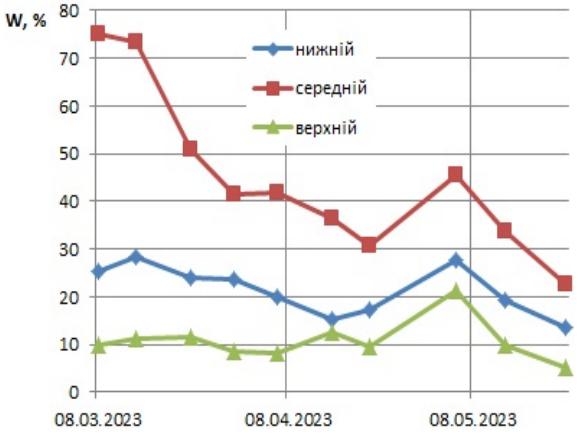
У процесі реалізації експерименту було проведено одноразовий полив досліджуваних зразків з метою імітації опадів у кількості 20 мм. Такий полив було проведено 3.05. З метою кращого аналізу впливу часу та факту проведеного поливу побудовано графічні залежності зміни вологості зразків за часом дослідження (рис. 5).



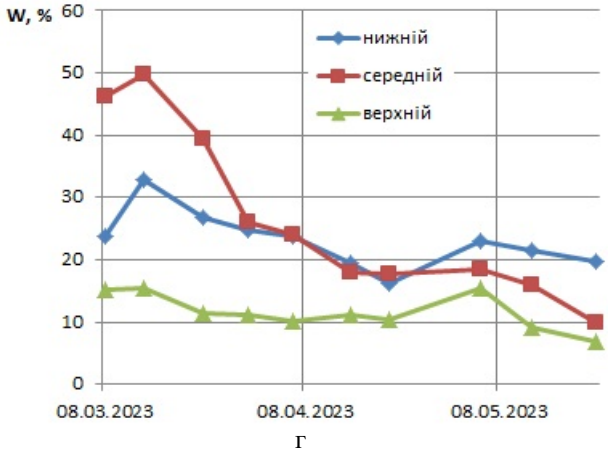
а



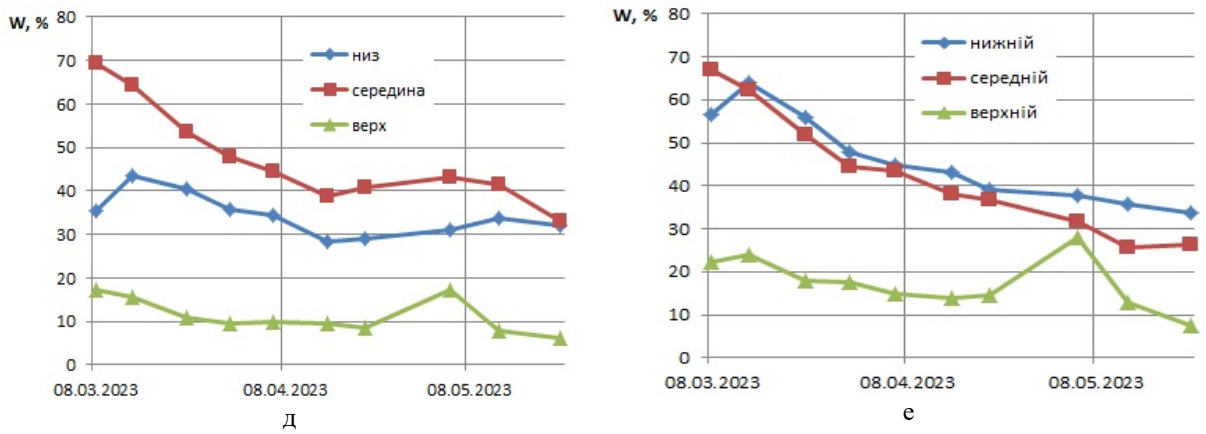
б



в



г



а – 1; б –2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6;

Рисунок 5 – Графічні залежності зміни вологості шарів досліджуваних зразків ґрунту та органічних добрив з часом дослідження для варіантів досліду (табл. 1)

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих результатів вказує на наявність чіткого розподілу вологості за досліджуваними шарами в усіх варіантах досліду. Особливо чітко диференціація спостерігалась на початку дослідження (рис. 4, а). При цьому мінімальна вологість виявлена у верхньому шарі. Найбільші значення вологості верхнього шару спостерігалась у варіантах досліду 1 та 6 і знаходилась у межах від 22-23 % (рис. 4, а) на початку експерименту до 12-14% перед поливом (рис. 4, е). У той же час вологість верхнього шару у решті варіантів досліду (2-5) знаходилась у межах 8-17% (рис. 4, а) на початку експерименту та 8-10 % перед поливом (рис. 4, є). Таким чином, найбільша міграція вологи до верхнього шару мала місце на глинистому ґрунті при застосуванні органічного добрива сапропель + січка соломи пшениці та на піщаному ґрунті і шарі органічного добрива сапропель + січка соломи льону.

Результати експерименту також вказують, що волога, накопичена у середньому шарі органічних добрив, найбільш інтенсивно мігрувала у нижній шар у всіх варіантах досліду із глинистим ґрунтом, де вирівнювання вологості у середньому та нижньому шарах відбулось протягом перших 30 діб дослідження (рис. 4, г). При цьому у варіантах дослідів із органічним добривом сапропель + січка соломи льону та сапропель + деревна тирса (рис. 5, г та е) вологість нижнього шару ставала рівною вологості середнього шару. Така ж тенденція збережена і після проведеного поливу. Так у варіантах досліду 1, 3 та 5 максимальна кількість доданої вологи була накопичена у середньому шарі (рис. 4, ж та з).

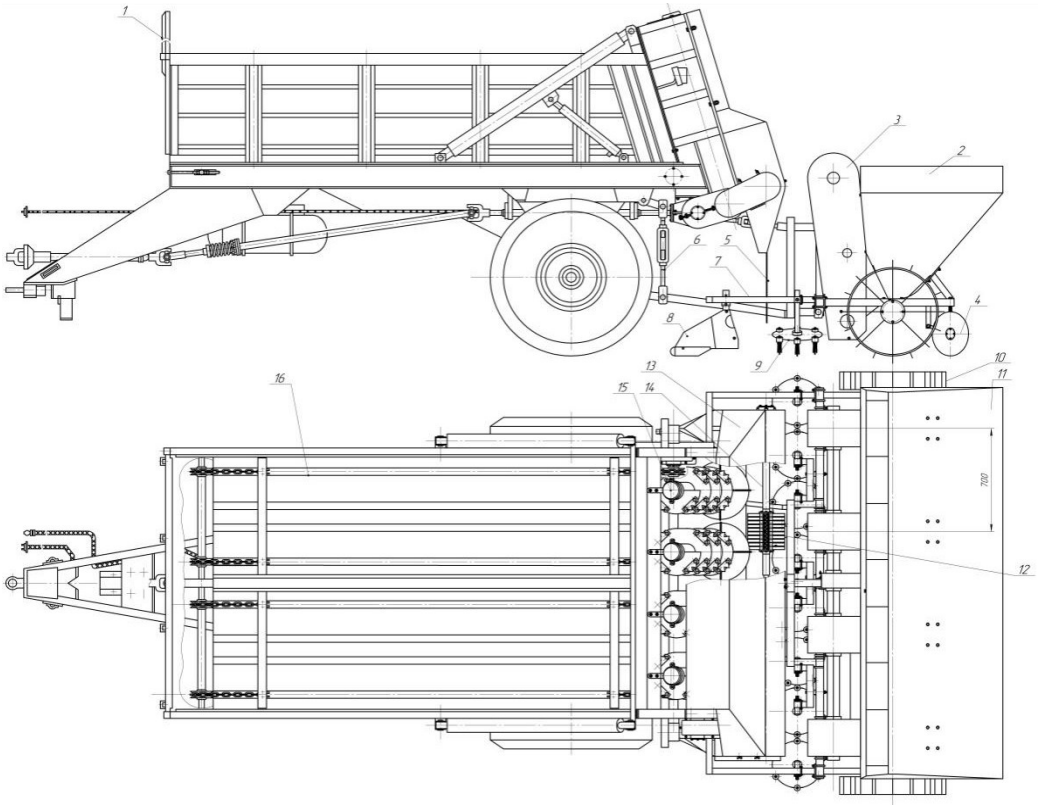
У варіантах досліду із піщаним ґрунтом максимальне утримування вологи середнім шаром виявлена у випадку використання в якості органічного добрива сапропелю + деревна тирса та сапропелю + січка соломи пшениці. Різниця у вологість між відповідними шарами тут знаходилась у межах 10–12% (рис. 5, а та в).

Таким чином, експериментальні дослідження підтверджують гіпотезу про можливість створення вологоутримуючого шару органічних добрив на основі сапропелю та органічних наповнювачів у вигляді січки соломи злакових культур, льону, деревної тирси тощо. Особливий ефект має місце на ґрунтах легкого механічного складу.

Для реалізації процесу формування шару добрив із підвищеною вологістю у ґрунті за умов вирощування сільськогосподарських культур широкорядного способу посадки (посіву) можна використати модернізовані розкидачі органічних добрив за

схемою, наведеною на рис. 6. Завдяки обладнанню розкидача додатково механізмом навіски з'являється можливість навішувати на нього даткові знаряддя. У наведеному на схемі випадку це чотирьохрядна картоплесаджалка. Окрім цього, на розкидач встановлюється додатковий корпус 13, в якому змонтовані направляючі лотки та дозуючий бітер 14 із закріпленими шарнірно лопатками. У той же час картоплесаджалка містить додаткову раму 7 із розміщеними на ній сошниками 8 та роторами 9. Завдяки таким удосконаленням наведений агрегат має здатність вносити стрічками у ґрунт органічні добрива підвищеної вологості та здійснювати садіння картоплі. Наведена схема може бути використана і під час агрегатування із посівними машинами для культур з міжряддям 70 см.

Висновок. Виявлені у результаті експериментальних досліджень закономірності перерозподілу вологи від органічних добрив підвищеної вологості до шарів ґрунту вказують на можливість використання сапропелю природної вологості для формування поживного шару із додатковим запасом вологи. З метою надання сапропелю вологістю 92–96 % механічних властивостей, які забезпечують механізоване внесення робочими органами існуючих машин для внесення твердих органічних добрив, його доцільно змішувати із доступними органічними наповнювачами. Такими органічними наповнювачами може бути січка соломи злакових культур, деревна тирса, подрібнена солома льону тощо.



1 – розкидач; 2 – картоплесаджалка; 3 - садильний апарат; 4 – дисковий загортач; 5 – фартух; 6 – механізм навіски; 7 – додаткова рама; 8 – сошник; 9 – ротор; 10 – опорно-привідні колеса; 11 – бункер; 12 – лопать; 13 – корпус; 14 – дозуючий бітер; 15 – розкидаючийбітер; 16 – транспортер

Рисунок 6 – Схема модернізованого розкидача органічних добрив

Джерело: розроблено авторами

Особливо яскраво ефект накопичення вологи у шарі органічних добрив підвищеної вологості на основі сапропелю виявлено на піщаному ґрунті. У той же час саме такого механічного складу ґрунти найбільш часто примикають до озер, що є родовищами органічного сапропелю. Такий ефект створює передумови до впровадження способу вирощування сільськогосподарських культур з широкорядним способом посіву (посадки), який передбачає створення у ґрунті смуг із органічних добрив підвищеної вологості на основі сапропелю із одночасним посівом цих культур. Такий спосіб може бути реалізований на основі модернізованого за схемою наведеною на рис.6 розкидача органічних добрив.

Перспективи подальших досліджень, на нашу думку, мають бути спрямовані на підбір оптимальних співвідношень між сапропелем природної вологості та органічними наповнювачами, а також можливістю введення до складу суміші додаткових макро - та мікроелементів, необхідних для забезпечення комплексного живлення рослин за конкретних ґрунтових умов.

Список літератури

1. Fertilizer use by crop in Ukraine. Published by FAO, Rome, 2005. 56 p.
2. Балюк С.А., Медведєв В.В., Воротинцева Л.І., Шимель В.В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. *Вісник аграрної науки.* 2017. № 8. С. 5-11.
3. Медведєв В.В. Проблеми охорони ґрунтів. *Вісник аграрної науки.* 2004. №1. С. 53-57.
4. Сергеєв В.В., Бенцаровський Д.М. Кисіль В.І. Агрохімічні пріоритети охорони родючості ґрунтів. *Вісник аграрної науки.* 2004. №11. С. 5-7.
5. Цизь І.Є., Хомич С.М. Сацюк В.В. Агро-екологічні аспекти добування та використання сапропелю. *Сільськогосподарські машини.* 2021. Вип. 47. С. 37-45. Doi:10.36910/acm.vi47.625
6. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., IevinshG. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content. *Zemdirbyste-Agriculture.* 2014. 101(4). Pp. 355–366. Doi:10.13080/Z-A.2014.101.045
7. Шевчук М.Й. Сапропелі України: запаси, якість та використання. Луцьк: Надстир'я, 1996. 383 с.
8. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Freshwater sapropel (gyttja): Its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture. *Agronomy Research.* 2016.14(3). Pp.929-947.
9. Tsiz I., Khomych S., Didukh V., Yukhymchuk S. Study of dehydration of organic sapropel by compression method . 22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava, 24.-26.05.2023. Pp. 173-178. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF033
10. Косолап М.П. Кротінов О.П. Система землеробства No-till (*Farming system No-till*). Київ: Логос, 2011. 372 с.
11. Kargwal R. et al. A review on global energy use patterns in major crop production systems. *Environmental Science: Advances 1.5.* 2022.Pp. 662-679.
12. Jaskulska I., Romaneckas K., Jaskulski D., Gałęzewski L., Breza-Boruta B., Dębska B., Lemanowicz J. Soil properties after eight years of the use of strip-till one-pass technology. *Agronomy.* 2020. 10(10).Pp. 1-16. DOI:10.3390/AGRONOMY10101596

References

1. *Fertilizer use by crop in Ukraine*. (2005).Published by FAO, Rome[in English].
2. Baluk, S.A., Medvedev, V.V., Vorotyntseva, L.I. & Shimel, V.V. (2017). Suchasni problemy dehradatsii gruntiv i zakhody shchodo dosiahnennia neitralnoho yii rivnia [Modern problems of soil degradation and measures to achieve a neutral level of soil degradation]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Herald of agrarian science, № 8*, 5-11 [in Ukrainian].
3. Medvedev, V.V. (2004). Problemy okhorony gruntiv [Problems of soil protection]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Herald of agrarian science*, *№1*, 53-57 [in Ukrainian].
4. Serheiev, V.V., Bentsarovskyi, D.M. & Kysil, V.I. (2004). Ahrokhimichni priorytety okhorony rodiuchosti gruntiv [Agrochemical priorities of soil fertility protection]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Herald of agrarian science, №11*, 5-7 [in Ukrainian].

5. Tsiz, I.E., Khomych, S.M. & Satsiuk, V.V. (2021). Ahro-ekolohichni aspekty dobuvannia ta vykorystannia sapropeliu [Agro-ecological aspects of mining and use of sapropel]. *Silskohospodarski mashyny – Agricultural machines, Issue 47*, 37-45. Doi:10.36910/acm.vi47.625 [in Ukrainian].
6. Grantina-Ievina, L., Karlsons, A., Andersone-Ozola, U., & Ievinsh, G. (2014). Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content. *Zemdirbyste – Agriculture, 101(4)*, 355–366. Doi:10.13080/Z-A.2014.101.045 [in English].
7. Shevchuk, M.I. (1996). *Sapropeli Ukrainy: zapasy, yakist ta vykorystannia* [*Sapropels of Ukraine: stocks, quality and prospects of use*]. Lutsk: Nadstyria [in Ukrainian].
8. Stankevica, K., Vincevica-Gaile, Z. & Klavins M. (2016). Freshwater sapropel (gyttja): Its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture. *Agronomy Research, 14(3),* 929-947[in English].
9. Tsiz, I., Khomych, S., Didukh, V.& Yukhymchuk, S. (2023). Study of dehydration of organic sapropel by compression method // *22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Development.* Jelgava.173-178. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF033[in English].
10. Kosolap, M.P. & Krotinov, O.P. (2011). *Systema zemlerobstva No-till* [*Farming system No-till*]. Kyiv: Lohos [in Ukrainian].
11. Kargwal, R. et al. (2022). A review on global energy use patterns in major crop production systems. *Environmental Science: Advances 1.5,* 662-679[in English].
12. Jaskulska, I., Romaneckas, K., Jaskulski, D., Gałęzewski, L., Breza-Boruta, B., Dębska, B., & Lemanowicz, J. (2020). Soil properties after eight years of the use of strip-till one-pass technology. *Agronomy, 10(10),* 1-16. Doi.org/10.3390/AGRONOMY10101596[in English].

Volodymyr Didukh, Prof., DSc., **Igor Tsiz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Tarasyuk**, PhD tech. sci., **Serhii Khomych**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Research of the Process of Formation of a Moisture-retaining Layer in the Soil

The purpose of the article is to study the regularity of moisture redistribution from organic fertilizers of high humidity to soil layers for the formation of a moisture-retaining layer during the cultivation of agricultural crops.

For research, soil, organic fertilizers of high humidity and soil again were laid in layers in cylindrical containers. The moisture content of the layers was measured every 7-10 days. As a result, a clear distribution of the humidity of the layers was found in all variants of the experiment. The minimum humidity is found in the upper layer. The greatest migration of moisture to the upper layer took place on clay soil and the application of organic fertilizer sapropel + chaff of wheat straw. The moisture accumulated in the middle layer of organic fertilizers migrated the most to the lower layer in all variants of the experiment with clay soil, where the equalization of moisture in the middle and lower layers occurred during the first 30 days of the study. In the variants of the experiment with sandy soil, the maximum moisture retention in the middle layer was found for the organic fertilizer sapropel + wood sawdust and sapropel + wheat straw chaff. In order to implement the process of forming a layer of fertilizers with increased soil moisture under the conditions of growing agricultural crops of the wide-row sowing method, a scheme of a modernized spreader of organic fertilizers is proposed.

The revealed regularities indicate the expediency of using sapropel of natural humidity for the formation of a nutrient layer on sandy soil. For the purpose of mechanized application by the working bodies of machines for solid organic fertilizers, it is advisable to mix sapropel with available organic fillers. The introduction of a method of growing agricultural crops with a wide-row sowing method, which involves the creation of strips of organic fertilizers of high humidity in the soil, can be implemented on the basis of a modernized, according to the scheme given in the article, spreader of organic fertilizers.

moisture-retaininglayer, soil, organicfertilizers, sapropel, filler, sowing

Одержано (Received) 06.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 19.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.365.2 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.158-166

Ruslan Kirchuk, Prof., PhD tech. sci., **Lyudmila Zabrodotskaya**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Taras Haponiuk**, post-graduate, **Ruslan Ferents**, post-graduate
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
e-mail: kirchukruslan@lutsk-ntu.com.ua

Experimental studies and mathematical model of the rapeseed seed drying process

The article shows the features of the drying oilseed crops technology, in particular rapeseed. The results of laboratory studies on drying rapeseed are presented, and the possibility of mathematical modeling and calculation is considered. Experimental studies of the drying process were carried out and a numerical experiment was carried out to obtain a mathematical model of heat treatment and dehydration of rapeseed in a thin layer.

rapeseed, drying agent, humidity, mathematical model, drying kinetics

Formulation of the problem. In Ukraine, interest in such an oilseed crop as rapeseed increases and decreases – it all depends on the external market and weather conditions. However, be that as it may, this is a common crop for domestic elevators, so the study of post-harvest processing of rapeseed is an actual task in the future.

It is important to remember that rapeseed seeds with a moisture content above 8% must be stored with mandatory systematic (at least once a day) control of the temperature of the grain mass, recording the results in a journal. Heat transfer in seed mass is almost 100 times less than that of air, so regular temperature measurements must be taken at various points to ensure proper control. The combination of high humidity and temperature during storage can cause spoilage and self-heating. If it is not possible to dry, then it is necessary to at least provide active ventilation, since humidity and ambient temperature also adjust the shelf life. Under unfavorable circumstances, the development of mold fungi will begin immediately. Fungi that develop seed mold is a constant component of the microflora not only of rapeseed. And as soon as a nutrient medium is created or a warm and humid climate, large colonies of mold fungi are formed. Therefore, you should not hesitate, rapeseed should be stored until drying with active ventilation, and if it is not possible to form a large batch, dry immediately and in portions.

For high-quality post-harvest seed treatment, it is necessary to ensure optimal conditions for the drying process. Based on experimental data, it is possible to theoretically select rational parameters that provide the most effective and high-quality drying conditions by performing a numerical experiment for various initial conditions.

Analysis of the latest research and publications. Post-harvest treatment of rapeseed begins with cleaning. Seeds are usually purified from impurities in two stages. During the first stage, large and light impurities are separated, and in the second stage – impurities of other crops, etc. It is the best to use a cleaning machine for these purposes that combines mechanical sieving and air flow cleaning.

Rapeseed is an oilseed crop, so it is better not to load it into the grain dryer with garbage. Debris can cause fires in the grain dryer. Before drying, rapeseed should be cleaned to basic values (Fig. 1). In addition to safety, such cleaning makes it possible to save gas

© Ruslan Kirchuk, Lyudmila Zabrodotskaya, Taras Haponiuk, Ruslan Ferents, 2023

consumption (you don't have to dry the garbage). Cleaning should be done in several stages. For cleaning, a 3.0 mm sieve is used to remove large impurities. Sieve with opening size 1.0 or 1.2 – for separating weed seeds.

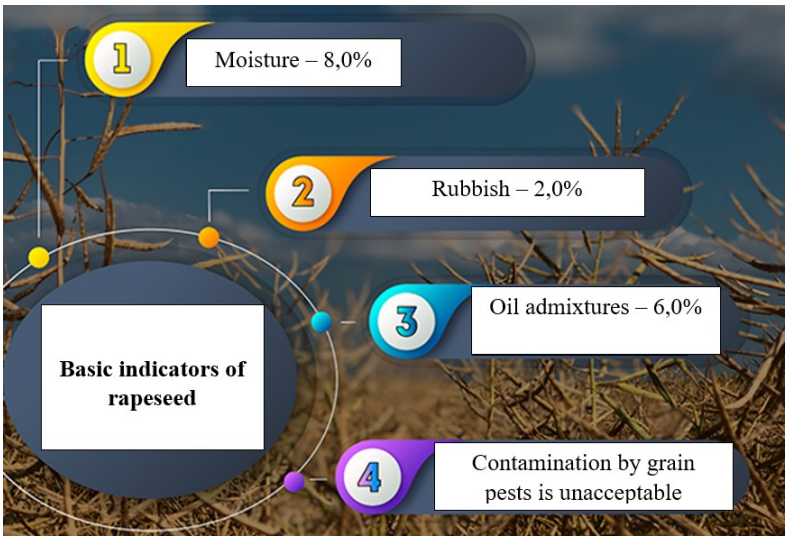


Figure 1 – Indicators of weediness in rapeseed seeds

Source: based on [1]

It is not recommended to store rapeseed for a long time at high humidity. Therefore, it is not always possible to accumulate large quantities of this crop and dry it in a stream. More often you have to do this in portions. As a rule, rapeseed is supplied for drying with different humidity levels – from 8.5% to 18–19%. When a batch of rapeseed accumulates to about 500 tons, then the grain dryer is started in the flow. Otherwise, drying is portioned [1].

Drying rapeseed is the most labor-intensive and responsible process in drying technology. Primarily because wet grain (classification of rapeseed is shown in Fig. 2) contains a high percentage of oil and protein and has a high risk of spontaneous combustion. In addition, it must be dried with extreme care so that the protein does not curl. However, there are rules that must be followed when drying with any dryer. In particular, this applies to temperature conditions.

Rapeseed is dried at a drying agent temperature of 50–60 °C, then the culture does not lose viability. Accordingly, when working with rapeseed, the dryer's productivity is 60–70% lower compared to drying grains. If up to 6% of moisture can be removed from sunflowers in one pass, then everything needs to be done in stages and 2–3% of moisture must be removed in the first pass. In the future, the amount of interest withdrawn can be increased, since the rapeseed will be less wet [2–6].

Attention should be paid to the fluidity of rapeseed. Rapeseed is like "water", prone to fluidity, so before loading the grain dryer, you must check and eliminate any cracks, loose connections, etc. This is especially important for shaft dryers, since the junction of the boxes with the walls of the shaft may not be tight. and increased gaps between the bends of the boxes and the walls of the shafts can lead to material losses. It is also necessary to adjust the unloading mechanism.

Saving energy resources when drying rapeseed is the main objective of the study. The main disadvantages of existing types of dryers include uneven drying of the material, uncontrollability of drying duration, and ineffective use of the energy potential of the drying

agent. It is possible to partially eliminate these disadvantages by using the proposed rapeseed dryer.

Formulation of the objective. The purpose of the work is to study the kinetics of the rapeseed seed drying process, describe it theoretically, create a mathematical model and automate the calculation process, which will allow us to determine the most optimal initial drying parameters.

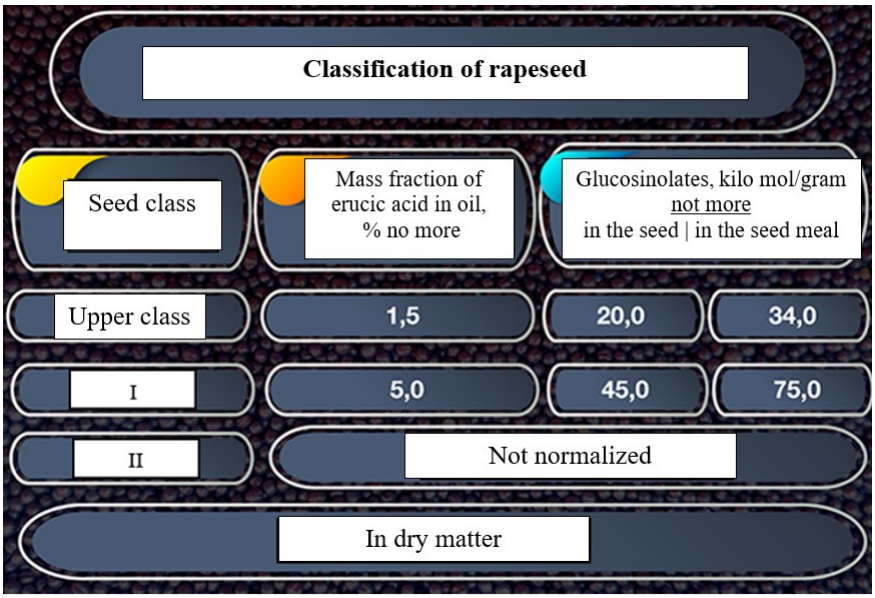


Figure 2 – Classification of rapeseed

Source: based on [1]

Presentation of the main material. For an experimental study of the process of drying rapeseeds, a developed laboratory installation was used (Fig. 3). The installation consists of a fan, heater, flexible connection, drying chamber with cassettes for material.

The installation works as follows: atmospheric air is supplied by a fan to the heater, heated to a temperature set by the regulator and supplied via a flexible connection to the drying chamber, in which numbered cassettes with samples are placed one above the other. The drying agent moves through cassettes with rapeseed samples installed in the specified sequence from bottom to top.

For drying, samples of material with a known initial moisture content and mass were poured into the cassettes.

Drying was carried out for an initial relative humidity of the material of 11% and 15.5% at a heated air temperature of 60–65°C and 45–50°C, respectively. At regular intervals, the mass values in each cassette were recorded, according to which the humidity was determined and graphs of changes in humidity over time were constructed (Fig. 4).

To calculate the process of drying rapeseeds, a stepwise method was used [3,8,9], described by a system of differential equations:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\gamma_M \cdot C_M}{\gamma_П \cdot C_П} \cdot \frac{\partial \theta}{\varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_M \cdot r'}{\gamma_П \cdot C_П \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\gamma_П \cdot \varepsilon}{10 \cdot \gamma_M} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial t} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\alpha_q \cdot \gamma_M}{\gamma_П \cdot C_П \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta); \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p), \quad (4)$$

where t – drying agent temperature °C;
d – moisture content of the drying agent, g/kg of dry air;
W – material moisture, %;
θ – grain temperature °C;
V – speed of drying agent, m/s;
$C_П$– heat capacity of material and air, kJ/kg °C;
e – porosity of the material layer;
r'– latent heat of vaporization of water, kJ/kg;
α_q– heat transfer coefficient, kcal/kg·h, °C;
$\gamma_м$– volume mass of material, kg/m3;
$\gamma_п$– specific gravity of air, kg/m3;
K – drying coefficient, 1/h;
W_p– equilibrium grain moisture %;
x – spatial coordinate, m;
τ– time, h.



Figure 3 – Installation for studying the process of drying rapeseeds
Source: developed by the authors

These equations reflect the law of conservation of energy and matter during the drying process, the law of heat and mass transfer between the material and the drying agent. Based on equations (1–4), the drying process of a thin layer of material over a period of time Δt is described by an algebraic system of equations:

$$\Delta t + \frac{C_M \cdot \gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_П \cdot C_П} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} - \frac{\gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_П \cdot C_П} \cdot \frac{r'}{100} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta\tau}; \quad (5)$$

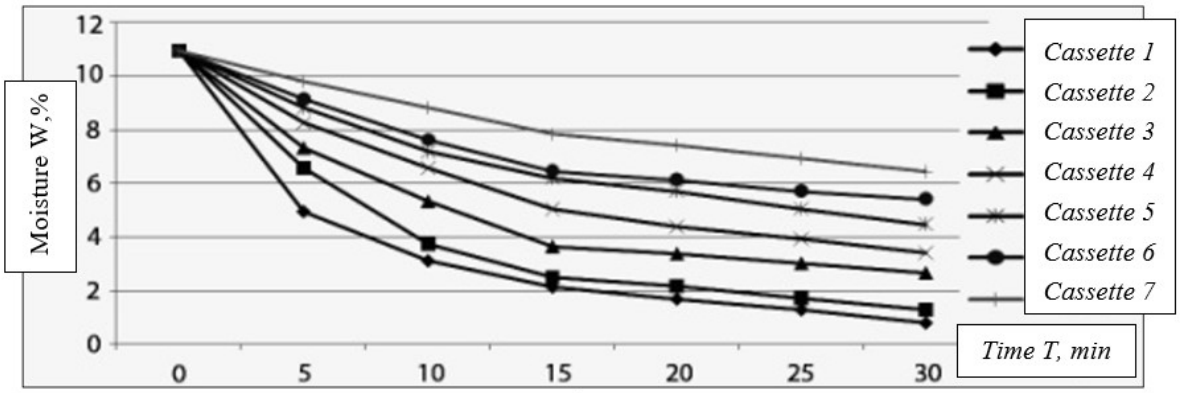
$$\Delta d = -\frac{10 \cdot \gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_П} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta\tau}; \quad (6)$$

$$\Delta t = -\alpha_q \cdot \frac{\gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_П \cdot C_П} \cdot (\theta - t); \quad (7)$$

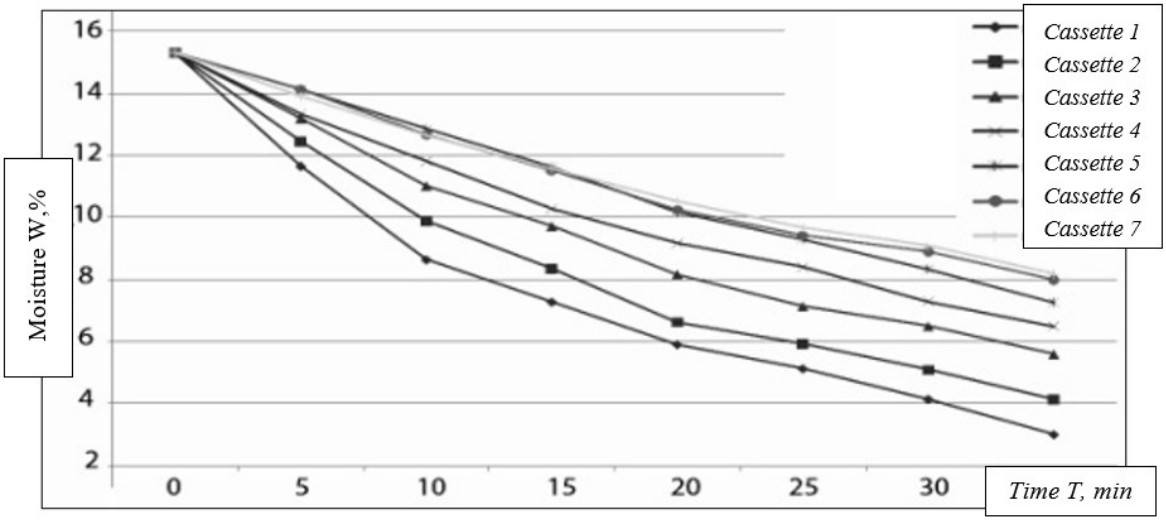
$$\Delta W = -K \cdot (W - W_p) \cdot \Delta\tau, \quad (8)$$

where δ – thickness of thin layer, m.

When calculating, the average diameter of one seed is taken as the thickness of the thin layer. The drying coefficient K [8, 9] depends on the properties of agricultural materials and the drying regime. It was established based on experimental data obtained during drying of rapeseeds (Fig. 4).).



a



b

Figure 4 – Change in seed moisture content during drying in a pilot plant (a) with an initial humidity of 11% and a drying agent temperature of 60–65°C and (b) with an initial humidity of 15.5% and a drying agent temperature of 45–50°C

Source: developed by the authors

For a thin layer of material, its temperature and the temperature of the drying agent are related by the relation:

$$\theta = \frac{t_{i-1} - t_i}{2}\ , \tag{9}$$

where t_{i-1}, t_i – the temperature of the drying agent at the entrance to the i-th layer and at the exit from it, °C.

Equation (8) allows you to exclude equations (3) and (7) from the calculation, and carry out the calculation without taking into account the heat transfer coefficient and temperature difference.

Thus, for the i-th thin layer in the time interval (j-1)·Δτ- j·Δτ the solution of system (5) – (8) for the material parameters initial at time (j-1)·Δτ: humidity Wi, j-ii temperature $\theta_{i,j-1}$, as well as the parameters of the drying agent at the entrance to the i-th layer (temperature $t_{i-1,j}$, moisture content $d_{i-1,j}$) determines the parameters of the drying agent at the exit from this layer and the grain at the moment of time j·Δτ.

$$t_{i,j} = (1 - A)\cdot t_{i-1,j} + A\cdot\theta_{i,j-1} - B\cdot K\cdot(W_{i,j-1} - W_p)\cdot\Delta\tau;$$

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + \frac{K}{10{,}2}\cdot(W_{i,j-1} - W_p);$$

$$W_{i,j} = W_{i,j-1} - K\cdot(W_{i,j-1} - W_p)\cdot\Delta\tau;$$

$$\theta_{i,j} = \frac{t_{i-1} - t_i}{2};$$

where

$$A = \frac{\mathrm{C_M}}{102\cdot\mathrm{C_П}\cdot\Delta\tau + 0{,}5\cdot\mathrm{C_M}};\ B = \frac{0{,}01\cdot r'}{102\cdot\mathrm{C_П}\cdot\Delta\tau + 0{,}5\cdot\mathrm{C_M}}.$$

The calculation of the drying process of a dense layer of rapeseed seeds is carried out according to the scheme presented in Fig. 5.

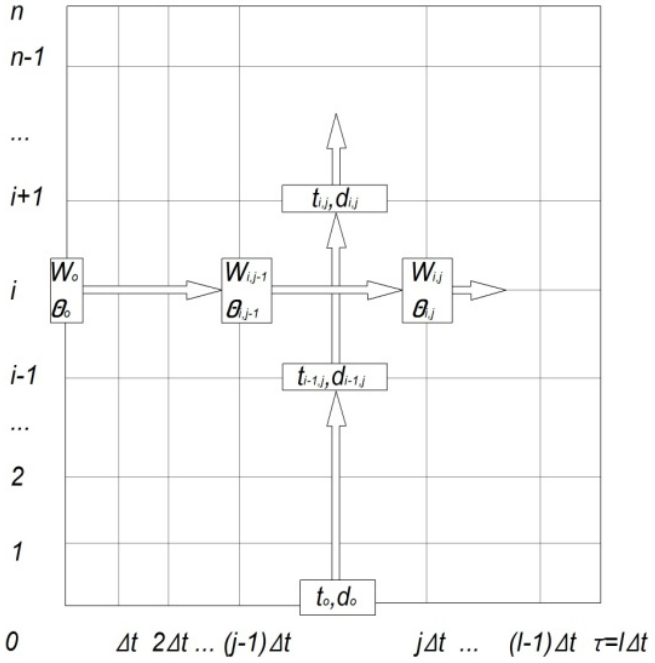
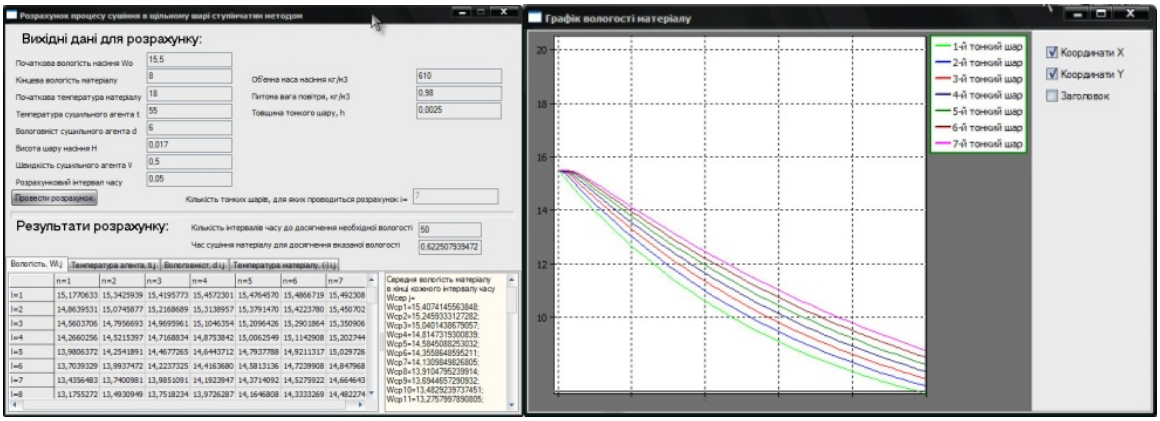


Figure 5 – Schematic diagram for calculating the drying process in a dense layer using the stepwise method

Source: developed by the authors

The described calculation method requires a large amount of computational work, which creates significant difficulties in mass calculations. A numerical experiment was carried out based on the developed software using Free Pascal/Lazarus IDE (Fig. 6).

The proposed model allows you to set the initial calculation parameters: the initial humidity and temperature of the material, the height of its layer and the thickness of the thin layer, the final humidity, moisture content, temperature and speed of movement of the drying agent are specified. As a result of the calculation, the results were obtained (Fig. 6.a): humidity and temperature of the material, as well as moisture content and temperature of the drying agent for each thin layer of material at specified intervals. Based on the data obtained, graphs were generated (Fig. 6.b).



a b

Figure 6 – Calculation of the drying process using the stepwise method:
a) calculation; b) plotting changes in humidity over thin layers of material

Source: developed by the authors

Conclusions. Based on the results of this work, experimental dependences of changes in the moisture content of rapeseed seeds over time were obtained for different temperatures of the drying agent and the initial moisture content of rapeseed seeds, on the basis of which the drying coefficient was determined; the possibility of theoretical calculation of the process of drying rapeseeds was considered, as a result of which an automatic calculation was implemented using a stepwise method using a computer, which makes it possible to make calculations, based on the results of which rational drying parameters can be adopted for a given crop.

The well-known stepwise calculation method can be applied to calculate the kinetics of the drying process using a computer and for other agricultural materials, for which it is necessary to first take into account their thermophysical properties and determine experimentally unknown coefficients. The reliability of the calculations is confirmed by comparison with experimental data from a study of the process of drying seed material.

Bibliography

1. Воробйова І. ProСушка Рапса . *Журнал «Elevatorist.com».* URL: https://elevatorist.com/spetsproekt/148-prosushka-kak-sushit-raps (дата звернення 05.11.23)
2. Пазюк Д.В., Шеманська Є.І., Пазюк В.М. Раціональні режими сушіння насіння ріпаку. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2021. №3 (114).С.98-103. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-11.
3. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Атаназевич В. І. Сушіння зерна. К.: Либідь, 1997. 352 с.
4. Snezhkin Yu. F., Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O. A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering. Romania: Bucharest.* 2020. № 2, vol. 61. P. 183–192.

5. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH–Agricultural Engineering.* 2018. Vol. 56, no.3. Pp. 39- 48, Bucharest/Romania.
6. Pazyuk V. Petrova Zn., Chepeliuk O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Vol. 7, Issue 1. Pp. 135-150. Kyiv.
7. Берегова О. М., Станкевич Г. М. Дослідження процесу сушіння насіння ріпаку *Вісник харківського державного університету сільського господарства.* 2001. Вип. 5. С.282 – 287.
8. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія. Луцьк: ЛДТУ, 2002. 165 с.
9. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології.* 2010. Вип.12. С. 9-37.
10. Вдосконалення сушарки насіння ріпаку / Л.Ю. Забродоцька, В.Л. Петров, Р.В. Кірчук, А.В. Хомич. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* 2019. №43 С. 69-79. DOI: https://doi.org/10.36910/agromash.vi43.203

References

1. Vorobyova, I. (2023). ProSyshka Rapsa [ProDrying Rapeseed]. *«Elevatorist.com».* Retrieved from https://elevatorist.com/spetsproekt/148-prosushka-kak-sushit-raps [in Ukrainian].
2. Pazyuk, D., Shemanska, E. & Pazyuk, V. (2021). Ratsionalni rezhymy sushinnia nasinnia ripaku [Rational methods of drying rapeseed]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport of agricultural industry, Issue 3(114),* 98-103 [in Ukrainian].
3. Stankevych, H.M., Strakhova, T.V. & Atanazevych, V.I. (1997). *Sushinnia zerna* [*Grain drying*]. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
4. Snezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O. & Tokarchuk, O.A. (2020). Determination of the energy efficient modesfor barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering.Romania: Bucharest, № 2, vol. 61*, P. 183–192 [in English].
5. Paziuk, V.M., Liubin, M.V., Yaropud, V.M., Tokarchuk, O.A. & Tokarchuk, D.M., (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH–Agricultural Engineering, Vol. 56, no.3,* Pp. 39-48 [in English].
6. Pazyuk, V., Petrova, Zn. & Chepeliuk, O. (2018). Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal, Vol. 7, Issue 1.* Pp. 135-150 [in English].
7. Berehova, O. . & Stankevych, H. . (2001). Doslidzhennia protsesu sushinnia nasinnia ripaku [Research on the process of drying rapeseed]. *Visnyk kharkivskoho derzhavnoho universytetu silskoho hospodarstva – Bulletin of Kharkiv State University of Agriculture, Issue 5*, 282 – 287 [in Ukrainian].
8. Didukh, V.F. (2002). *Pidvyshchennia efektyvnosti sushinnia silskohospodarskykh materialiv* [*Improvements in the drying efficiency of agricultural materials*]. Lutsk: Lutsk National Technical University [in Ukrainian].
9. Haivas, B. (2010). Matematychne modeliuvannia konvektyvnoho sushinnia materialiv z urakhuvanniam mekhanotermodyfuziinykh protsesiv [Mathematical modeling of convective drying of materials taking into account mechano-thermo-diffusion processes]. *Fizyko-matematychne modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii – Physico-mathematical modeling and information technologies. Issue 12*, 9-37 [in Ukrainian].
10. Zabrodotska, L.Iu., Petrov, V.L., Kirchuk, R.V. & Khomych, A.V. (2019) Vdoskonalennia susharky nasinnia ripaku [Improvement of rape seed dryer]. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st. – Agricultural machines : Journal of scientific articles . Issue 43*, 69-79 [in Ukrainian].

Р.В. Кірчук, проф., канд. техн. наук, **Л.Ю. Забродоцька**, доц., канд. техн. наук, **Т.О. Гапонюк**, асп., **Р.В.Ференц**, асп.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

Експериментальні дослідження та математична модель процесу сушіння насіння ріпаку

Загалом, до такої олійної культури як ріпак інтерес у світі то збільшується, то знижується – все залежить від зовнішнього ринку та погодних умов. Цедосить поширена культура для вітчизняних елеваторів, тому дослідження процесів післязбирального обробітку ріпаку є актуальним завданням. Метою роботи є дослідити кінетику процесу сушіння насіння ріпаку, описати її теоретично, створити математичну модель і автоматизувати процес розрахунку, що дасть змогу визначити найбільш раціональні початкові параметри сушіння.

Для проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіння ріпаку було розроблено та використано лабораторну установку. Отримані експериментальним чином параметри процесу сушіння були використані при математичному моделюванні та проведенні числового експерименту. Математична модель сушіння тонкого шару ріпаку ґрунтується на застосуванні відомої теорії тепло-масообміну та методу ступінчатого розрахунку процесу сушіння. Достовірність розрахунків підтверджуються співставленням з результатами експериментуз дослідження процесу сушіння насіннєвого матеріалу.

За результатами роботи отримано експериментальні залежності зміни вологості насіння ріпаку від часу для різних температур сушильного агенту і початкової вологості насіння, на основі яких визначено коефіцієнт сушіння. Створено математичну модель процесу сушіння насіння ріпаку, в результаті чого реалізовано автоматичний розрахунок ступінчатим методом за допомогою ЕОМ, що дає можливість провести обчислення, за результатами яких можна приймати раціональні параметри сушіння для даної культури.

Дану модель можливо застосувати для розрахунку кінетики процесу сушіння і для інших сільськогосподарських матеріалів, для чого необхідно попередньо врахувати їх теплофізичні властивості і визначити експериментально невідомі коефіцієнти.

ріпак, сушильний агент, вологість, математична модель, кінетика сушіння

Одержано (Received) 14.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 03.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.17 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.166-175

О.А. Бурлака, доц., канд. техн. наук, **А.О. Келемеш,** доц., канд. техн. наук, **О.В. Горбенко,** доц., канд. техн. наук
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
e-mail: anton.kelemesh@pdau.edu.ua

Елементи організації операційних технологій в рослинництві з урахуванням аграрних ризиків

Тематика представленої статті охоплює системне оцінювання операційних технологій в галузі рослинництва, де одним з ключових факторів є імовірність недоотримання запланованих кінцевих результатів виробництва під впливом аграрних ризиків. Обґрунтування та вибір оптимальної технології вирощування та збирання певної групи сільськогосподарських культур є складною багатокритеріальною техніко-організаційною задачею. На практиці досить часто спостерігаються випадки, коли максимальні технічні, економічні організаційні, технологічні зусилля та витрати у рослинництві не приносять очікуваного запланованого результату щодо ефективності сільськогосподарського виробництва. При цьому постає актуальне практичне та прагматичне питання: чи доцільно в складних економічних та політичних умовах економіки країни використовувати максимум ресурсного, технічного та технологічного забезпечення виробничих процесів у рослинництві, якщо співвідношення «витрати – отриманий результат» може бути набагато менше очікуваних планових показників, і, при цьому, має місце значний вплив некерованих людиною факторів щодо вирощування та збирання сільськогосподарських культур, таких, як наприклад, агрокліматичні ризики. Вважаємо, що в такому варіанті, більш доцільно обирати технології навіть з меншим потенціалом ресурсного забезпечення, направлені на збільшення економічної стійкості виробництва у випадках настання збиткових виробничих результатів під впливом агрокліматичних ризиків.

В даній публікації планування виробничих процесів щодо організації операційних технологій в рослинництві розглянемо на прикладі порівняння та вибору оптимального, за умови врахування агрокліматичних ризиків, варіанту, на прикладі вирощування та збирання озимої пшениці.

технологія, рослинництво, ризик, технологічний процес, оптимізація, критерій

© О.А. Бурлака, А.О. Келемеш, О.В. Горбенко, 2023

Постановка проблеми. Виробничі процеси в сучасному промисловому рослинництві характеризуються значною різноманітністю та мають різний ступінь адаптації відносно агрокліматичних умов регіону, де застосовуються [1, 2].

Огляд методичних та методологічних складових системи організації операційних технологій в галузі рослинництва доводить не тільки велику кількість різноманітних алгоритмів дій осіб, що приймають рішення, але й визначає шляхи подальшого вдосконалення таких задач, що повинні бути адаптовані з урахуванням мінливих початкових умов ведення виробничої діяльності. Останні шляхи, на нашу думку, потребують подальшого дослідження та удосконалення.

Відомі алгоритми розрахунку та техніко-економічного обґрунтування тієї чи іншої сільськогосподарської технології в галузі рослинництва орієнтовані на детермінований кінцевий результат. Як правило, це урожайність сільськогосподарської культури, чи валовий збір, чи, наприклад, рентабельність виробництва. Але, що суттєво важливо, такі величини при плануванні виробничих процесів приймаються сталими. А на практиці, при реалізації подібних проектів, в тому числі у галузі рослинництва – валовий збір збіжжя є імовірнісною величиною, і у разі недоотримання обсягу врожаю тієї чи іншої сільськогосподарської культури, виробник отримує збитки, іноді критичні для подальшого відновлення виробничих процесів.

Не можливо за даного питання не парувати наявністю позитивного європейського досвіду щодо аграрного страхування ризиків, пов’язаних з майбутнім урожаєм сільськогосподарських культур. Але в нашій країні, в умовах сьогодення маємо складну економічну ситуацію, яка таке питання відводить у розряд другорядних через цілу низку економіко-політичних складових.

Нами пропоновано один з варіантів організації операційних технологій у рослинництві за умови врахування можливості як недоотримання очікуваного планового врожаю, так і отримання збитків за результатами настання агрокліматичних ризиків в рослинництві. При цьому пропонований алгоритм дій базується на методах багатокритеріального оцінювання операційних технологій та методиках порівняння прийнятих господарських рішень щодо виробництва з урахуванням імовірності природи кінцевих результатів [9, 12].

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій. Організаційні аспекти щодо покращення виробничих процесів і операційних технологій в сільськогосподарському виробництві в цілому, і в тому числі, і у галузі рослинництва, висвітлені у наукових та науково-навчальних працях відомих вчених, таких, як П.Т. Саблука, В.Я. Месель-Веселяка [1], Ю. П. Нагірного, С. М. Клименка, О. С. Дубрової, Д.І. Мазоренка, Г.Є. Мазнєва, С.І. Мельника, Л.М. Тіщенка, В.Я. Амбросова, Н.Ю. Гавриловича, О.О. Краснорущького та ін.

Так, наприклад, в публікації [2] описані результати дослідження, що направлені на психологічну оцінку особи, яка приймає господарські рішення, описується готовність до прийняття ризикованих рішень, як наслідок виховання такої особи. При цьому пропоновано вдосконалювати систему психологічних тестів, що формують поведінку фахівців [2].

В науковій праці [3] рекомендовано більшу увагу при прийнятті господарських та управлінських рішень приділяти невизначеності, особливо багатокритеріальній невизначеності.

Інші вчені Свиноус І., Гаврик О., Свиноус Н. [4] наголошують на актуальності розробки системи інформаційного забезпечення моніторингу діяльності сільськогосподарського підприємства.

Роль фінансових інститутів в рамках впровадження антикризової політики детально розглянуто в публікації [5].

Проблематика впровадження ризик-орієнтованого підходу до управління підприємствами, де акцентується значна увага виконаного дослідження на інтеграцію ризик-менеджменту в бізнес-процеси, описана в праці [6].

Вчені Савків У., Сидор Г., Тимків А. запропонували до виробничого впровадження систему управління зовнішньоекономічними ризиками в складних умовах, при цьому така система відрізняється інноваційним алгоритмом прийняття управлінських рішень [7].

Щодо аграрного сектору економіки та галузі рослинництва зокрема, то відомі вчені Мазоренко Д.І., Мазнєв Г.Є., Мельник С.І. та ін. розробили технології вирощування та збирання основних сільськогосподарських культур, але при цьому варіанти недоотримання врожаю під впливом системи ризиків не розглядаються [8].

Впровадження системного підходу в рослинництві та методологічні складові оптимізації машинно-тракторного парку містять праці [10, 11, 12].

Авторами Клименко Т.В., Омельяненко Д.О., Барабась О.С., Дуброва А.В. зроблено акцент на врахування впливу ризиків та прийняття господарських рішень в умовах невизначеності [9, 13].

Методичні аспекти та їх практичне застосування щодо багатокритеріального вибору машин і обладнання для проведення комплексу механізованих робіт у рослинництві містять наукові публікації [14, 15].

Проте сучасні виробничі умови у галузі рослинництва відрізняються динамічними змінами як у диспаритетах цін на енергоносії, засоби виробництва та сільськогосподарську продукцію, так і кон'юнктурі аграрних ринків. Тому охарактеризований напрямок наукового дослідження має логічне пояснення щодо подальшого розвитку, поглибленого вивчення та вдосконалення.

Постановка завдання. Завдання проведеного дослідження визначено нами як удосконалення методичних та методологічних елементів щодо порівняння та обґрунтування вибору складових операційних технологій в рослинництві з урахуванням агрокліматичні ризиків щодо прогнозування кінцевих результатів виробництва. Розрахунки здійснено на прикладі організації виробничих процесів по вирощуванню та збиранню зерна озимої пшениці на площі 100 га.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що одним з основних елементів, шо створюється та розраховується при організації виробництва тієї чи іншої сільськогосподарської культури, є технологічна карта. Остання містить організаційну, технологічну, технічну, економічну та іншу допоміжну інформацію щодо виробничих процесів у рослинництві. Як базовий варіант, технологічна карта може бути розрахована на 100 га ріллі [8], при цьому методологічних аспектів щодо виконання розрахунків технологічної карт, досить багато [8, 10].

В нашому варіанті для прикладу наведені розрахунки різних варіантів технологічних карт щодо вирощування та збирання зерна озимої пшениці. Розрахунки проведено за допомогою прикладного програмного забезпечення, розробленого у середовищі Excel доцентом Бурлакою О. А. характерною відмінністю таких розрахунків є наявність алгоритму вибору основних засобів виробництва в залежності від головного цільового критерію. Таким критерієм слугують: максимальна продуктивність машинно-тракторних агрегатів, мінімально можлива витрата палива агрегатів; критерій екологічності агрегатів, оптимізація виробничих та експлуатаційних витрат як складові собівартості технологій, оптимізація капіталовкладень.

З метою нівелювання такого економічного показника, як інфляція, розрахунки виконано в енергетичних еквівалентах. Вагомою відмінністю таких розрахунків є й те, що, наприклад, один варіант технології можливо прорахувати як максимально ефективний – з очікуваною найвищою плановою урожайністю, так і при врахуванні можливих втрат до рівні беззбитковості виробництва і нижче. Остання умова необхідна для порівняння варіантів та здійснення багатокритеріального вибору технологій з урахуванням імовірнісної природи агроекологічних ризиків у рослинництві.

Основні результати розрахунків технологій вирощування та збирання зернам озимої пшениці на площі 100 га наведено в табл.1. Показники розраховані за плановою урожайністю 5 т/га, показники рентабельності розраховані і за умов настання агроекологічних ризиків і недоотримання врожаю з кроком 1 т/га.

Для застосування методичних та методологічних складових обґрунтування організаційного рішення з вибору кращого варіанту операційних технологій виробництва озимої пшениці з урахуванням стійкості виробничої системи до агрокліматичних ризиків, припускаємо, що величина запланованої урожайності сільськогосподарської культури має імовірнісну природу. В нашому випадку приймаємо таку величину дискретно з кроком 1 т/га, маємо як п’ять варіантів: *S1*, *S2*, *S3*, *S4* і *S5*.

Таблиця 1 – Розрахункові показники технологічної карти на вирощування та збирання зерна озимої пшениці, площа 100 га, планова урожайність – 5 т/га

Планова урожайність 5 т/га	Домінуючий критерій вибору та комплектування машинно-тракторних агрегатів			
	Варіанти технологій виробництва			
Показники	Продуктив-ність, max	Паливо, min	Собівартість, min	Капітало-вкладення, min
H (затрати праці), год	860,0	902,3	1038,7	1154,5
$H_{га}$ (трудомісткість 1га), год/га	8,6	9,0	10,4	11,5
$H_т$ (трудомісткість 1 т), год/т	1,72	1,80	2,08	2,31
G (паливо), л	5517,3	4565,0	5189,0	6196,0
$G_{га}$ (паливо на 1 га), л/га	55,2	45,7	51,9	62,0
$G_т$ (паливо на 1 т), л/т	11	9,1	10,4	12,4
Енерговитрати, МДж	3512939,2	3435790,2	3496182,5	3581541,6
Енерговитрати на 1 га, МДж/га	35129,3	34357,	34961,8	35815,4
Енерговитрати на 1 т, МДж/т	7025,8	6871,5	6992,0	7163,0
Валовий вихід зерна, т	500,0	500,	500,0	500,0
Рентабельність 5 т/га, %	134,8	106,	167,5	154,1
Рентабельність 4 т/га, %	114,4	100,0	164,6	149,8
Рентабельність 3 т/га, %	92,5	77,0	137,9	123,
Рентабельність 2 т/га, %	55,7	34,0	85,0	73,2
Рентабельність 1 т/га, %	-13,0	-23,0	1,7	-5,2
Урожайність, нижче якої збиток, т/га	2,1	2,4	1,0	1,9

Джерело: розроблено авторами

Для порівняння та обґрунтування організаційного рішення позначимо чотири варіанти застосування технології підприємством: *A1* – операційні технології з домінуючим фактором – продуктивність машинно-тракторних агрегатів; *A2* – операційні технології з домінуючим фактором – мінімально можливі витрати палива машинно-тракторними агрегатами; *A3* – операційні технології з домінуючим фактором – мінімально можлива собівартість виробничих процесів; *A4* – операційні технології з домінуючим фактором – мінімально можливі капіталовкладення.

Наступним кроком, за описаними алгоритмами та рекомендаціями [9], маємо визначити кожну пару факторів досліджуваної технологічної системи стану середовища – *Sj* та низку варіантів рішення – *Ai*. Таким показникам повинні відповідати значення функціоналу оцінювання – *V (Ai, Sj)*.

З метою проведення подальших аналітичних розрахунків створюємо так звану «платіжну» матрицю, остання наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця стану виробничої системи («платіжна матриця») складена за результатами організації та планування виробництва зерна озимої пшениці з урахуванням імовірнісної природи кінцевих результатів (альтернатив станів середовища)

Варіанти рішень (рекомендовані технології)	Варіанти станів середовища (урожайність озимої пшениці)				
	S1 = 1, т/га	*S2* = 2, т/га	*S3* = 3, т/га	*S4* = 4, т/га	*S5* = 5, т/га
A1	-13,21	55,76	92,52	114,44	134,87
A2	-23,15	34,25	77,96	100,04	106,06
A3	1,76	85,92	137,94	164,66	167,52
A4	5,23	73,28	123,55	149,85	154,13
Імовірність стану середовища	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3

Джерело: розроблено авторами

Обов'язковою умовою є прийняття сумарної імовірності стану середовища, рівною одиниці. Будемо використовувати методику обґрунтування організаційного рішення за критеріями Байєса – варіант досліджуваних технологічних систем, коли відомі значення ймовірностей станів; за критеріями Лапласа у варіанті повної невизначеності; за критеріями Гурвіца, де особа, що приймає організаційно-господарські рішення попередньо визначає коефіцієнтом оптимізму. Продовженням розрахунків може бути застосування методики за правилом оцінювання «максімакс», критеріями Вальда та критеріями Севіджа [9].

Алгоритм обґрунтування кращої технології за критерієм Байєса заснований на формулах [9]:

$$\text{для } F^{+}: \; A_i^{*} = \max_i \left[V\left(A_i, S_j\right) \cdot P_j \right]; \tag{1}$$

$$\text{для } F^{-}: \; A_i^{*} = \min_i \left[V\left(A_i, S_j\right) \cdot P_j \right]. \tag{2}$$

Якщо необхідно знайти оптимальне організаційно-господарське рішення по вибору кращої, стійкої до агрокліматичних ризиків технології виробництва сільськогосподарських культур в рослинництві, то цільовою функцією є максимізація рентабельності виробництва. Таким чином, оцінювальний функціонал буде мати позитивний градієнт – F^{+}, при цьому використовуються і відповідні формули. Результати розрахунків містить табл. 3. Нами отримано, що відповідно до критерію

Байєса оптимальним організаційно-господарським рішенням по вибору технологій є варіант *А3*, що містить технологію виробництва озимої пшениці, де комплекси машинно-тракторних агрегатів підібрані з урахуванням умов максимально можливого зниження виробничих витрат та собівартості виробництва в цілому.

При застосуванні критерію Лапласа, необхідно врахувати, що останній необхідно характеризується невідомими розподілами ймовірнісних станів досліджуваної технологічної системи. Критерій Лапласа заснований на принципах так званого «недостатнього обґрунтування», тобто, якщо відсутня інформація, достатня для визначення більш вагомого відносно імовірності одного зі станів досліджуваного середовища, то всі можливі ймовірності станів технологічних систем необхідно вважати рівнозначними. Варіанти оптимальних альтернатив, що визначаються з використанням критерію Лапласа, можливо розрахувати з використанням наступних формул [9]:

$$\text{для } F^+: \ A_i^* = \max_i \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} V\left(A_i, S_j\right) \right]; \tag{3}$$

$$\text{для } F^-: \ A_i^* = \min_i \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} V\left(A_i, S_j\right) \right]. \tag{4}$$

За нашими розрахунками, методика визначення оптимальних альтернатив з порівнюваних технологій за критерієм Лапласа також обґрунтовує як оптимальне варіант організаційно-господарського рішення А3 (табл.3).

Обґрунтування оптимального організаційно-господарського щодо вибору ризикостійких технологій у рослинництві з використанням методик критерію Вальда, здійснюється за допомогою формул:

$$\text{для } F^+: \ A_i^* = \max_i \min_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right]; \tag{5}$$

$$\text{для } F^-: \ A_i^* = \min_i \max_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right]. \tag{6}$$

Результати розрахунків за даним критерієм також містить табл. 3, маємо кращу альтернативу *А3*, але можливо рекомендувати до виробництва і варіант організаційно-технологічного рішення *А4*. При цьому, якщо ступінь настання агроекологічного ризику велика, розглядається можливість настання низького врожаю зерна озимої пшениці, то чітка тенденція визначення оптимальної альтернативи в порівнюваних технологіях майже відсутня, виконані розрахунки знаходяться у в межах статистичної похибки.

Таблиця 3 – Вибір оптимального рішення за критерієм Байєса, Лапласа, правилом «максімакс», критерієм Вальда

Варіанти рішень	Критерій Байєса	Критерій Лапласа	Правило «максімакс»	Критерій Вальда
А1	97,55	76,88	134,87	-13,21
А2	78,53	59,03	106,06	-23,15
А3	136,10 **(А3)**	111,56 **(А3)**	167,52 **(А3)**	1,76
А4	123,76	101,21	154,13	5,23 **(А4)**

Джерело: розроблено авторами

Застосування наступного оптимізаційного алгоритму порівняння пропонованих технологій вирощування та збирання озимої пшениці – критерію Севіджа дещо відрізняється від попередніх методик. В такому випадку необхідно здійснити побудову

так званої «матриці ризику». Така матриця створюється шляхом лінійного перетворення функціоналу оцінювання – «платіжної матриці».

Для проведення відповідних перерахунків використовуються наступні формули [9]:

$$\text{для } F^{+}:\ R_{ij}^{*} = \max_i \left[V\left(A_i, S_j\right) \right] - V\left(A_i, S_j\right); \tag{7}$$

$$\text{для } F^{-}:\ R_{ij}^{*} = V\left(A_i, S_j\right) - \min_i \left[V\left(A_i, S_j\right) \right]. \tag{8}$$

В нашому випадку застосування критерію Севіджа на основі матриці ризику проводиться з використанням формули [5]:

$$A_i^{*} = \min_i \max_j \left[R_{ij} \right]. \tag{9}$$

Результати розрахунків наведено в табл.4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків щодо вибору оптимального рішення із застосуванням критерію Севіджа

Варіанти рішень	Матриця ризику (R_{ij}) Варіанти станів ризику					$\max_j \left[R_{ij} \right]$	$\min_i \max_j \left[R_{ij} \right]$
	R1	*R2*	*R3*	*R4*	*R5*		
A1	18,4	30,1	45,4	50,2	33,0	50,2	
A2	28,3	51,6	59,9	64,6	61,8	64,4	
A3	3,4	0	0	0	0	3,4	*A3*
A4	0	11,9	14,3	14,8	13,3	14,8	

Джерело: розроблено авторами

Згідно з отриманими результатами, з використанням методики оптимізації технологій за критерієм Севіджа оптимальним буде варіант технологічної карти *A3*.

При застосуванні методичних складових критерію Гурвіца, можливо визначити та обґрунтувати раціональний баланс між прогнозованими подіями граничного оптимізму та прогнозованими імовірнісними випадками граничного песимізму. Останнє твердження можливо реалізувати при введенні у розрахунки коефіцієнта оптимізму α. Такий коефіцієнт α знаходиться в межах від нуля до одиниці та являється характеристикою ступеня схильності керівника, що приймає організаційно-технологічні рішення, до оптимістичної чи песимістичної моделі поведінки. За умови, що коефіцієнт оптимізму $\alpha = 1$, то це визначається як граничний крайній оптимізм, за умови, що коефіцієнт оптимізму $\alpha = 0$ маємо варіант граничної песимістичної моделі керівника. У нашому випадку приймаємо коефіцієнт $\alpha = 0{,}6$.

Оптимальне рішення щодо технології вирощування та збирання зерна озимої пшениці з використанням методики за критерієм Гурвіца визначається за допомогою формул [9]:

$$\text{для } F^{+}:\ A_i^{*} = \max_i \left[\alpha \max_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right] + \left(1-\alpha\right) \min_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right] \right]; \tag{10}$$

$$\text{для } F^{-}:.\ A_i^{*} = \max_i \left[\left(1-\alpha\right) \max_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right] + \alpha \min_j \left[V\left(A_i, S_j\right) \right] \right]. \tag{11}$$

Результати розрахунків за критерієм Гурвіца наведено в табл. 5.

І в останньому, за критерієм Гурвіца, випадку розрахунків оптимальним з урахуванням умов ризикології, є рішення альтернативної технології *A3* мінімізація виробничих витрат при проведенні механізованих робіт.

Таблиця 5 – Вибір оптимального рішення за критерієм Гурвіца

Варіанти рішень	Матриця рентабельності $V\left(A_i, S_j\right)$					$\max_j [V(Ai,Sj)]$	$\min_j [V(Ai,Sj)]$	$\alpha \cdot \max_j [V(Ai,Sj)] + (1-\alpha) \cdot \min_j [V(Ai,Sj)]$	$\max_i [\alpha \cdot \max_j [V(Ai,Sj)] + (1-\alpha) \cdot \min_j [V(Ai,Sj)]]$
	Варіанти станів середовища								
	S1	S2	S3	S4	S5	S4	S5		
A1	-13,2	55,7	92,5	114,4	134,8	134,8	-13,2	75,6	
A2	-23,1	34,2	77,9	100,0	106,0	106,0	-23,1	54,3	
A3	1,7	85,9	137,9	164,6	167,5	167,5	1,7	101,2	A3
A4	5,2	73,2	123,5	149,8	154,1	154,1	5,2	94,5	

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. За складних економіко-політичних умов ведення сучасного промислового аграрного виробництва в галузі рослинництва спостерігається ситуація, коли не завжди максимально можливі вкладення у технологію та використання в повному обсязі ресурсного потенціалу дає наприкінці виробництва очікуваний позитивний результат з високими показниками економічної ефективності. Валовий збір зерна, і, відповідно урожайність сільськогосподарської культури являється стохастичною імовірнісною величиною залежить від впливу агрокліматичних ризиків. При цьому, в нашій країні система аграрного страхування майже не працює.

2. Нами запропоновано адаптувати відомі методики прийняття господарського рішення в умовах невизначеності та ризику, що використовуються в економічних системах, до систем організації виробничих процесів у сільському господарстві у галузі рослинництва на прикладі порівняльних розрахунків технологічних карт по вирощуванню та збиранню зерна озимої пшениці. Використано методичні та методологічні аспекти обґрунтування кращих альтернатив об'єкту дослідження за умов невизначеності та ризику на основі критеріїв Байєса, Лапласа, Гурвіца, Вальда, Севіджа, правила «максімакс».

3. При здійсненні виробничого впровадження описаних у статті рекомендацій за темою даного дослідження треба зауважити, що при прийнятті організаційно-господарського рішення щодо визначення кращої відносно стійкості до агрокліматичних ризиків системи операційних механізованих технологій, вплив ризиків мінімізується та не виключається. Якщо настання події повної втрати врожаю є критичним для даного підприємства, призводить до невідновлювальних втрат, то необхідно застосовувати систему індексного аграрного страхування (за індексом урожайності сільськогосподарської культури) з обов'язковим врахуванням специфіки агрокліматичних умов регіону, де здійснюється сільськогосподарське виробництво.

Список літератури

1. Аграрний сектор економіки України (стан та перспективи розвитку) / В.М. Присяжнюк та ін.; за ред. М.В. Присяжнюка, М.В. Зубця, П.Т. Саблука, В.Я. Месель-Веселяка, М.М. Федорова. К. : ННЦ ІАЕ, 2011. 1018 с.
2. Artemov V., Synhaivska I. FEATURES OF DECISION-MAKING PROCESSES UNDER UNCERTAINTY. *"Scientific notes of the University "KROK"*. 2022. С. 149–163. URL: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-65-149-163

3. Мартинова, О. В. Класифікація невизначеності та її роль в прийнятті управлінських рішень. *Human problems and ways to solve them* : *The VI International Scientific and Practical Conference, October 23-25, 2023, Rome, Italy. 286 p.* (p. 57).
4. Свиноус І., Гаврик О., Свиноус Н., Свиноус І. Методичні підходи до формування аналітичного забезпечення моніторингу діяльності сільськогосподарських підприємств. *Економічний дискурс*, 2023. (1-2). С. 26–35. https://doi.org/10.36742/2410-0919-2023-1-3
5. Кацицка Г., Намлієв Є. Кризові явища як основа виникнення дестабілізаційних процесів в економіці: актуальність теорій та розвиток кризисологічних досліджень. *Київський економічний науковий журнал*. 2023. № 1. С. 103–116. URL: https://doi.org/10.32782/2786-765x/2023-1-13
6. Дуднєва Ю., Зайцева А. Ризик-орієнтоване управління підприємствами в умовах невизначеності зовнішнього контексту. *Adaptive Management Theory and Practice Economics*. 2023. Т. 15, № 30. URL: https://doi.org/10.33296/2707-0654-15(30)-10
7. Prokopyshyn O. S., Trushkina N. V., Serbina T. V. Regarding the Organization of Foreign Economic Logistics Activities of Agrarian Enterprises in the Conditions of War. *HERALD OF THE ECONOMIC SCIENCES OF UKRAINE*. 2022. No. 1(42). P. 209–217. URL: https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1(42).209-217
8. Технологічні карти та витрати на вирощування сільськогосподарських культур з різним ресурсним забезпеченням / Д.І. Мазоренко та ін. ; за ред. Д.І. Мазоренка, Г.Є. Мазнєва. Х.: ХНТУСГ, 2006. 725 с.
9. Клименко С.М., Дуброва О.С. Обґрунтування господарських рішень та оцінка ризиків : навч. посібник. К. : КНЕУ, 2005. 252 с
10. Проектування технологічних систем рослинництва / В.М. Павловський, Нагірний Ю.П., Мельник І.І. Тернопіль: Збруч, 2003. 264 с.
11. Мельник І.І., Бабій В.П., Марченко В.В. Оптимізація управління машинно-тракторним парком. К.: НАУ, 2000. 38 с.
12. Нагірний Ю.К., Хомяк В.В. Планування механізованих робіт методами лінійного програмування. Дубляни: ЛДСГІ, 1995. 32с.
13. Планування ефективного використання техніки : навч. посіб. / І.І. Мельник та ін. Ніжин. ТОВ «Видавництво Аспект-поліграф», 2005. 80 с.
14. Нагірний Ю.П. Обґрунтування інженерних рішень. К. : Урожай, 1994. 216 с.
15. Управління конкурентоспроможністю підприємства: навч. посіб. / С.М. Клименко та ін. К. : КНЕУ, 2008. 520 с.
16. Бурлака О.А., Яхін С. В., Дудник В.В., Іванкова О.В., Дрожчана О.У. Багатокритеріальний вибір сучасних зернозбиральних комбайнів. Аналітичні аспекти. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, Вип. 199 «Механізація сільськогосподарського виробництва», 2019. С. 5-20.
17. Burlaka O.A., Yakhin S.V., Padalka V.V., Burlaka A O. 100 tons per hour, what is next? Let us compares and analyzes characteristics of the latest models of highly productive combine harvesters. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*. 2021. (3), 274–288. doi: 10.31210/visnyk2021.03.34

References

1. Prysiazhniuk, V.M., Zubets, M.V. & Sabluk, P.T. (2011). Ahrarnyi sektor ekonomiky Ukrainy (stan ta perspektyvy rozvytku) . M.V. Prysiazhniuka, M. V. Zubtsia, P.T. Sabluka, V.Ia. Mesel-Veseliaka, M.M. Fedorova (Eds.). Kyiv : NNTs IAE [in Ukrainian].
2. Artemov, V. & Synhaivska, I. (2022). FEATURES OF DECISION-MAKING PROCESSES UNDER UNCERTAINTY. *"Scientific notes of the University "KROK"*. С. 149–163. Retrievd from https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-65-149-163
3. Martynova, O.V. (2023). Klasyfikatsiia nevyznachenosti ta yii rol v pryiniatti upravlinskykh rishen. In *The VI International Scientific and Practical Conference" Human problems and ways to solve them", October 23-25, 2023, Rome, Italy. 286 p.* (p. 57) [in Ukrainian].
4. Svynous, I., Havryk, O., Svynous, N. & Svynous, I. (2023). Metodychni pidkhody do formuvannia analitychnoho zabezpechennia monitorynhu diialnosti silskohospodarskykh pidpryiemstv. *Ekonomichnyi dyskurs, (1-2),* 26–35.https://doi.org/10.36742/2410-0919-2023-1-3 [in Ukrainian]
5. Katsytska, H. & Namliiev, Ye. (2023). Kryzovi yavyshcha yak osnova vynyknennia destabilizatsiinykh protsesiv v ekonomitsi: aktualnist teorii ta rozvytok kryzysolohichnykh doslidzhen. *Kyivskyi ekonomichnyi naukovyi zhurnal, № 1,* 103–116. URL: https://doi.org/10.32782/2786-765x/2023-1-13 [in Ukrainian].
6. Dudnieva, Yu. & Zaitseva, A. (2023). Ryzyk-oriientovane upravlinnia pidpryiemstvamy v umovakh nevyznachenosti zovnishnoho kontekstu. *Adaptive Management Theory and Practice Economics*, *Issue 15, № 3*0. Retrieved from https://doi.org/10.33296/2707-0654-15(30)-10 [in Ukrainian].

7. Prokopyshyn, O.S., Trushkina, N.V. & Serbina, T.V. (2022). Regarding the Organization of Foreign Economic Logistics Activities of Agrarian Enterprises in the Conditions of War. *HERALD OF THE ECONOMIC SCIENCES OF UKRAINE*, *No. 1(42),* P. 209–217. Retrieved from https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.1(42).209-217
8. Mazorenko, D.I., Mazniev, H.Ie., Melnyk, S.I., et al. (2006). Tekhnolohichni karty ta vytraty na vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur z riznym resursnym zabezpechenniam. D.I. Mazorenka, H.Ie. Maznieva (Eds.). Kharkiv : KhNTUSH [in Ukrainian].
9. Klymenko, S.M. & Dubrova, O.S. (2005). *Obgruntuvannia hospodarskykh rishen ta otsinka ryzykiv* [*Justification of business decisions and risk assessment*]. Kyiv : KNEU [in Ukrainian].
10. Pavlivskyi, V.M., Nahirnyj, Yu.P. & Mel'nyk, I.I. (2003). *Proektuvannia tekhnolohichnykh system roslynnytstva* [*Designing technological systems of crop production*]. Ternopil : Zbruch [in Ukrainian].
11. Melnyk, I.I., Babii, V.P. & Marchenko, V.V. (2000). *Optymizatsiia upravlinnia mashynno-traktornym parkom* [*Optimization of the management of the machine and tractor park*]. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
12. Nahirnyi, Yu.K. & Khomiak, V.V. (1995). *Planuvannia mekhanizovanykh robit metodamy liniinoho prohramuvannia* [*Планування механізованих робіт методами лінійного програмування*]. Dubliany: LDSHI [in Ukrainian].
13. Melnyk, I.I, Demydko, M.O., Fryshev, S.H. et al. (2005). Planuvannia efektyvnoho vykorystannia tekhniky : Navchalnyi posibnyk. Nizhyn. TOV "Vydavnytstvo Aspekt-polihraf" [in Ukrainian].
14. Nahirnyi, Yu.P. (1994). Obgruntuvannia inzhenernykh rishen. Kyiv : Urozhai [in Ukrainian].
15. Klymenko, S.M., Omelianenko, T.V., Barabac, D.O., Dubrova, O.S. & Vakulenko, A.V. (2008). Upravlinnia konkurentospromozhnistiu pidpryiemstva: navch. posib. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].
16. Burlaka, O.A., Yakhin, S.V., Dudnyk, V.V., Ivankova, O.V., Drozhchana, O.U. (2019). Bahatokryterialnyi vybir suchasnykh zernozbyralnykh kombainiv. Analitychni aspekty. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva, Issue 199 «Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva»,* 5-20 [in Ukrainian].
17. Burlaka, O. A., Yakhin, S. V., Padalka, V. V., & Burlaka, A. O. (2021). 100 tons per hour, what is next? Let us compares and analyzes characteristics of the latest models of highly productive combine harvesters. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, *(3),* 274–288. doi: 10.31210/visnyk2021.03.34

Oleksii Burlaka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anton Kelemesh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Gorbenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Elements of the Organization of Operational Technologies in Crop Production Considering Agrarian Risks

The topic of the presented article covers the systematic evaluation of operational technologies in the field of crop production, where one of the key factors is the probability of failure to achieve the planned final production results under the influence of agrarian risks. Justification and selection of the optimal technology for growing and harvesting a certain group of agricultural crops is a complex multi-criteria technical and organizational task. At the same time, an urgent practical and pragmatic question arises: is it expedient in the difficult economic and political conditions of the country's economy to use the maximum of resource, technical and technological support of production processes in crop production, if the ratio "costs - the obtained result" can be much less than the expected planned indicators, and, at the same time, there is a significant influence of non-human-controlled factors regarding the cultivation and harvesting of agricultural crops.

In this publication, we will consider the planning of production processes regarding the organization of operational technologies in crop production as an example of comparing and choosing the optimal option, considering agro-climatic risks, using the example of growing and harvesting winter wheat.

When carrying out the production implementation of the recommendations described in the article on the topic of this study, it should be noted that when making an organizational and economic decision to determine the best relative resistance to agro-climatic risks of the system of operational mechanized technologies, the impact of risks is minimized and not excluded. If the occurrence of a complete crop loss event is critical for a given enterprise and leads to irreparable losses, then it is necessary to apply the system of index agricultural insurance with mandatory consideration of the specifics of the agro-climatic conditions of the region where agricultural production is carried out.

technology, crop production, risk, technological process, optimization, criterion

Одержано (Received) 10.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 24.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 636.002 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.176-185

В.В. Кравченко, доц., канд. техн. наук, **А.В. Войтік,** доц., канд. техн. наук,
І.О. Лісовий, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
e-mail: kr.vasyl.v@gmail.com, av.afex81@gmail.com, lisov.iv.ol@gmail.com

Застосування мехатронних систем в системі машин для тваринництва

Розглянуто застосування мехатронних систем при утриманні тварин та птиці, забезпеченні мікроклімату, напуванні, кормороздаванні, видаленні гною та отриманні продукції. Проведені дослідження показують, що майже у всіх механізованих процесах в тваринництві використовуються мехатронні системи, які вже або використовуються на фермах або знаходяться ще на етапах розробки та досліджень. Основним рушієм впровадження мехатронних систем в тваринництві є зменшення затрат праці, покращений контроль за механізованими процесами на фермі, покращення виконання механізованих технологічних процесів та забезпечення комфорту тварин.
мехатронні системи, машини для тваринництва, утримання, догляд, первинна продукція

Постановка проблеми. Розвиток сучасного тваринництва нерозривно поєднаний з розвитком технологій. Ця теза стосується як досліджень, спрямованих на вивчення та врахування біологічних особливостей тварин, так і технічних засобів, які використовуються при їх утриманні, годівлі, догляді та одержанні первинної продукції. Основною метою технічних удосконалень існуючих машин та розробки нових машин є забезпечення максимальної ефективності технологічних процесів, економія трудових ресурсів, а також економія часу [1].

З іншого боку, розвиток різноманітних технічних засобів повинен також сприяти комфорту тварин [2], забезпечуючи комфортні умови їх утримання, створюючи умови максимально близькі до так званого «органічного» утримання тварин, що передбачає зменшення обмежень щодо їх пересування та сприяти створенню умов, близьких до їх природнього життя.

Напрям розвитку технічних засобів в сільському господарстві загалом та механізації тваринництва зокрема спрямований на сучасні інформаційні технології, широке використання мікропроцесорної техніки і мехатронних систем, активний розвиток робототехніки в тому числі, ставлячи такі технічні засоби і технології на новий рівень [1]. Також, особливого значення набувають технології штучного інтелекту, які застосовуються при аналізі великих даних в робототехніці. Штучний інтелект відіграє важливу роль в управлінні життєвим циклом інформації, що включає обробку даних, управління інформаційними потоками та знаннями тощо [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження мехатронних технічних засобів при утриманні різних видів тварин та птиці наведені в багатьох джерелах. При цьому ці дослідження розглядають впровадження мехатронних систем в тваринництві з різних кутів зору: з технічного, експлуатаційного, економічного [4], екологічного, впливу на комфорт тварин тощо. Так автори роботи [5], застосувавши метод інформаційно-логічного аналізу вітчизняних та закордонних науково-технічних джерел інформації узагальнили світовий досвід техніко-технологічного забезпечення

© В.В. Кравченко, А.В. Войтік, І.О. Лісовий, 2023

виробництва молока в контексті перспектив застосування смарт-технологій. Ними запропоновано класифікацію автоматичних систем машинного доїння корів та структуру концептуальної моделі процесу виробництва молока на основі смарт-технологій. В роботі [6] на основі аналізу літературних джерел досліджено концепцію ефективного управління виробництвом SmartFarm, в основу якої покладено інноваційні технології максимальної автоматизації та роботизації усіх технологічних процесів. Питання застосування мехатронних систем в сільському господарстві в загальному та в тваринництві зокрема розглянуто авторами робіт [7, 8]. В роботі [8] приведено комплексне дослідження, з оглядом останніх джерел, розвитку та впливу застосування цифрових та мехатронних систем на всі сфери сільськогосподарського виробництва, з урахуванням їх переваг та недоліків. Можливий позитивний та негативний вплив мехатронних впроваджень на тваринницьких фермах на комфорт тварин, їх взаємодію з людиною та навколишнім середовищем розглянуто в роботах [9, 10], де на основі досліджень зроблено висновок, що при впроваджені нових технологій при роботі з тваринами, до уваги повинні братись не тільки економічні фактори, але і моральні, етичні та соціальні [9].

В роботі [10] зроблено детальний огляд літературних джерел в питанні використання засобів точного тваринництва для моніторингу пересування та поведінки тварин на пасовищах та на фермі, використання сенсорів та штучного інтелекту при контролі за здоров'ям тварин, застосування сучасних технічних засобів при годівлі тварин та автоматизованих засобів доїння корів. Автори статті [11] продемонстрували, що техніку та цифрові технології слід розглядати як ключові елементи агроекологічного переходу на нову стадію розвитку.

Детальний огляд джерел та безпосередньо аграрних роботів зроблено авторами статті [12]. Значна частина досліджень спрямована на огляд роботів, які використовуються в тваринництві, а саме роботів, які беруть участь у приготуванні та роздаванні кормів, доїльних роботів, роботів для збирання яєць.

Адаптацію тваринництва в цілому до індустріальної революції Industry 4.0 із запровадженням новітніх технологій точного тваринництва розгорнуто подали автори роботи [13]. Дослідниками проаналізовано значну кількість літературних джерел та структуровано основні досягнення та впровадження по видам тварин, а саме – великій рогатій худобі, вівцям, козам, свиням та птицям. Також виділено окремо впровадження засобів точного тваринництва по областям їх застосування, таким як контроль хвороб, дослідження поведінки тварин, їх біологічні цикли, продуктивність та годівля, доїння.

В статті [14] також аналізуються досягнення Industry 4.0, які дозволяють робити виробництво продукції тваринництва більш передбачуваним. Досліджується роль датчиків, BIGDATA, штучного інтелекту та машинного навчання в зниженні витрат виробництва, підвищення ефективності, покращення комфорту тварин.

Постановка завдання. Метою даної роботи є систематизація досліджень та впроваджень мехатронних систем в системі машин для утримання, догляду та отримання первинної продукції тваринництва.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо застосування мехатронних систем в системі машин по утриманню тварин та птиці, забезпеченні мікроклімату, напуванні, кормороздаванні, видалені гною та отримані продукції.

Утримання тварин. Розвиток мехатронних систем в системі утримання тварин передбачає керування процесу пересування тварин фермою. Автори роботи [15] розглядають щонайменше чотири поширені варіанти стратегії переміщення корів, які використовуються в стадах з автоматичними системами доїння та використанням «розумних воріт»: (1) вільний рух корів, де корови мають доступ до місць годівлі та

відпочинку в корівнику без обмежень; (2) примусовий рух корів в односторонні ворота, що перекривають шлях від зони відпочинку до зони годівлі, тому корови, які залишають зону відпочинку, повинні увійти в доїльний бокс, щоб їх доїли, або «відмовили», залежно від інтервалу часу після останнього доїння. Після видоювання корову випускають до зони годівлі, а в зону відпочинку вона може повернутися лише через односторонні ворота; (3) примусовий рух корів із «попереднім відбором» через сортувальні ворота, які спрямовують корів, або до зони для доїння, або до зони годівлі. Це скорочує час очікування корів перед доїнням, оскільки до доїльного робота проходять лише корови, які підлягають доїнню; (4) примусовий рух корів із зони відпочинку до зони годівлі через односторонні ворота, але повернутися назад до зони відпочинку вони можуть лише через роботизоване доїльне місце або через сортувальні ворота, які спрямовують корів, непридатних для доїння, безпосередньо зони відпочину.

При утриманні овець та кіз пропонується застосовувати автоматично керовані сортувальні ворота та системи зважування, що підключені до програмного забезпечення для керування стадом, яке сортує тварин у групи або змінює існуючі групи та відокремлює тварин, які потребують, наприклад, лікування [16]. Такі системи мінімізують як затрати праці, так і час, витрачений на перегрупування та переміщення тварин, які зазвичай застосовуються для досягнення одноманітності в групах по надоях молока [17].

Також, при вигульному утриманні тварин на пасовищах, для моніторингу тварин можуть використовуватись безпілотні літальні апарати. Безпілотники можна використовувати для загального огляду стада чи огорож або для допомоги у випасанні тварин, при переходах тварин з пасовища до ферми і навпаки. Також з допомогою дронів можна оглядати пасовища. Так, Precision Hawk пропонує дрони для картографування, огляду та фотографування пасовищ [18].

Забезпечення мікроклімату. Системи вентиляції тваринницьких приміщень є одними з основних елементів із забезпечення належного мікроклімату при утриманні тварин і птиці. У сучасних вентиляційних системах використовуються програмовані багатоступінчасті контролери для управління всім вентиляційним обладнанням [19]. Вентиляційні системи можуть включати вентилятори зі змінною швидкістю, одношвидкісні вентилятори, зволожувачі повітря, підігрів або охолодження повітря та регулювання розміру прохідних отворів. Їх можна використовувати для керування вентиляцією на фермах зі звичайною, тунельною та перехресною вентиляцією. Датчики, приєднані до контролерів вентиляції, надають дані для налаштування обладнання для керування температурою, відносною вологістю та якістю повітря в корівнику. Однією з переваг багатоступеневих контролерів є те, що всі вентилятори та впускні отвори керуються однаковою інформацією датчика. Датчики температури, вологості, швидкості повітря та концентрації газу є найбільш часто використовуваними датчиками з контролерами вентиляції.

Сучасні контролери є складнішими, ніж прості термостати, які мають установку температури лише для одного користувача. Правильно налаштований багатоступеневий контролер може послідовно вмикати всі нагрівачі, вентилятори та охолоджувальне обладнання та економити енергію [20].

Напування. Напування є одним з базових механізованих процесів в тваринництві і використання автоматизованих напувалок не є новиною. З точки зору впровадження елементів мехатронних систем в цей процес, можна розглядати засоби контролю споживання води індивідуально кожною твариною. Адже вода є найважливішою поживною речовиною, яка безпосередньо впливає на продуктивність і комфорт тварин. Необхідно забезпечити достатню кількість чистої води для отримання оптимальних

умов утримання тварин і одержання продукції. Тому вимірювання індивідуального споживання води тваринами може надати інформацію про їхній стан здоров'я [21]. Система вимірювання та реєстрації споживання води запропонована авторами [22] та випробувана на молочній фермі. Вона надавала інформацію про добову кількість споживаної води, тривалість щоденного споживання та об'єм щоденного споживання води кожною коровою на фермі. Що дозволило моніторити несприятливі зміни у здоров'ї корів та виявляти на ранніх стадіях захворювання, що, в подальшому, зменшувало витрати на лікування тварин. Також таку систему моніторингу пропонується використовувати для наукових досліджень.

Кормороздавання. Застосування мехатронних систем в автоматичному годуванні важливо для взаємодії окремих елементів, від кормозабірника до кормового столу [23].Відомі стаціонарні системи кормороздавання у вигляді конвеєрів і мобільні системи, такі як самохідні або координатні роздавачі-змішувачі [24].

До автоматичних мобільних систем годівлі відносяться роботи-кормороздавачі та роботи підгортачі. Роботи управляються датчиками. Кормороздавач може автоматично заповнюватися зі стаціонарних змішувальних ємностей і здатний роздавати корм праворуч або ліворуч [25].

Так, робот-підрівнювач корму Lely Juno може використовуватися в корівниках будь-якого типу, для всіх рівних і брукованих кормороздавальних проходів, автоматично переміщаючись уздовж кормових решіток різних видів. Під час роботи він підгрібає вал корму висотою до 65 см. Робот-підрівнювач корму працює від акумуляторів і після кожного циклу роботи повертається до зарядної станції. Такий робот пересувається за допомогою трьох коліс (два з яких привідні) [26].

Залежно від ситуації на фермі існують різні системи приводів відповідно до джерела живлення. Найбільша різноманітність представлена серед рейкових автоматичних систем годування. Проте приводи мають низку вимог, а також переваги та недоліки. Мобільні роботи-кормороздавачі можуть працювати від дизельного двигуна або електродвигуна, що живиться від акумулятора. Стаціонарні ж кормороздавачі з конвеєрними стрічками приводяться в дію електроенергією через електродвигуни. Координатні кормороздавачі представляють собою підвішений на рейці бункер із ваговим пристроєм. Живлення забезпечується батареями, тяговими кабелями або через рейку. Контроль (частота роздачі корму, склад раціону тощо) здійснюється за допомогою комп'ютера безпосередньо в бункері для подачі [24].

Ще однією перевагою стаціонарних автоматичних систем кормороздавання є менша потреба в просторі для утримання тварин, тобто, можна використовувати вузькі кормові алеї. При цьому можна з'єднувати кілька різних будівель, зовнішніми рейками чи закритими стрічковими транспортерами, щоб забезпечити безперебійну роботу системи в будь-яку пору року.

Автори роботи [27] провели дослідження можливості використання мехатронних систем для створення системи автоматичного розпізнавання ваги та розмірів тварин при розміщенні тварини перед годівницею для автоматичного регулювання кількості виданого корму окремим тваринам.

Видалення гною. Впровадження мехатронних систем в системах видалення гною реалізується в автоматизованих скребкових системах та в застосуванні мобільних роботів для прибирання гною [28]. В роботі [29] дослідили роботу мобільних роботів DeLaval і Lely для видалення гною на молочних фермах, при безприв'язному утриманні тварин, і задоволеність фермерів їх обладнанням. Автори вказують, що основними проблемами при використанні таких роботів були «застрягання» (72,3%), забруднення датчиків положення (14,9%) і проблеми, пов'язані з процесом зарядження цих роботів

(8,6%). Вони відмітили такі переваги цих машин, як висока якість очищення, довговічність і безпека, нескладність в обслуговувані, зменшення робочого навантаження на працівників та покращення здоров'я ніг тварин.

В роботі [30] відмічають що роботизація видалення гною має перевагу перед механічними системами, так як при будівництві нових та реконструкції існуючих тваринницьких приміщень відпадає необхідність у виконанні ряду будівельних робіт, наприклад з поглиблення підлоги для гнойових каналів, установки приводних та натяжних пристроїв тощо. Автоматизована система управління дозволяє індивідуально програмувати час очищення, відстань та швидкість руху, маневрування, поведінку робота при зустрічі з твариною й перешкодами. При 18 годинах роботи за добу (решту часу потрібно на підзарядку акумулятора) та швидкості руху близько 4 м/хв робот здатний прибрати гній з території, площею понад 4000 м^2.

Для прикладу, робот для видалення гною з приміщень LelyDiscoveryCollector працює наступним чином: агрегат розчиняє водою гній, всмоктує його й потім автоматично зливає в збиральну яму. Цей робот має дві форсунки для збризкування водою: передню і задню. Передня форсунка призначена для розм'якшення слизького шару й відтак для більш ґрунтовного очищення; задня форсунка забезпечує збереження підлоги мокрою, щоб запобігти швидкому новому прилипанню до підлоги гною й бруду. Процес прибирання приміщення відбувається відповідно до запрограмованого маршруту і встановлених оператором часових меж. Однак підлога приміщення має бути рівною, без перегородок. Навігаційна система агрегату складається з двох ультразвукових датчиків, гіроскопу і відповідного програмного забезпечення [26].

Отримання продукції: доїння. Автоматичні доїльні системи – одна з перших розробок точного тваринництва та використання мехатронних систем в тваринництві [31]. Вони зробили революцію в молочному скотарстві в усьому світі. Впровадження автоматичних систем доїння також започаткувало зміни у роботі всієї ферми. Мехатронні системи в нових системах доїння впроваджуються в доїльних роботах, автоматизованих доїльних залах і карусельних доїльних залах. Такі системи набувають все більшої популярності завдяки можливості скоротити ручну роботу на молочних фермах, забезпечують необхідну частоту доїння на добу навіть за відсутності працівників ферми. Це сприяє підвищенню надоїв [32]. Відомо, що на ефективність доїння можуть впливати різні фактори, зокрема: частота доїння (менша сприяє зниженню надою), кількість корів на одного робота (велика кількість тварин може збільшити конкуренцію в стаді та негативно вплинути на загальний надій) та тип корівника (нові, побудовані спеціально для використання автоматизованих систем доїння, можуть працювати більш ефективно, підвищуючи продуктивність) [33].

Отримання продукції: збирання яєць. В сучасних машинах для збирання та обробки яєць також використовуються роботизовані системи. Відомо, що при підлоговому утримані птиці кількість яєць знесених поза гніздами становлять (0,1–2)% добової продукції [34].Так автори роботи [35] представили дослідження щодо розробки робота для збору підлогових яєць. PoultryBot автономний мобільний робот для використання в пташниках. PoultryBot може автономно переміщуватися, уникаючи зіткнень з перешкодами та птицею. При випробуваннях цього робота зареєстровано 46% успішно зібраних яєць, 37% не були зібрані успішно і 16% були пропущені. Результати демонструють дієвість концепції PoultryBot і можливість автономного збору яєць з підлоги в промислових пташниках. Крім того, вони вказують на те, що застосування розумних автономних транспортних засобів у щільному середовищі тварин та птиці є можливим.

Проведений аналіз дозволив виділити основні сфери застосування мехатронних систем у системі машин для тваринництва (табл. 1).

Висновки. Проведені дослідження показують, що майже у всіх механізованих процесах утримання, догляду та отримання продукції в тваринництві та птахівництві використовуються мехатронні системи, які вже або мають конкретні конструктивні рішення та використовуються на фермах або знаходяться ще на етапах розробки та досліджень. Концепції їх впровадження можуть мати різні назви: SmartFarm, системи точного тваринництва, автоматизація та роботизація тощо. Основним рушієм впровадження мехатронних систем в тваринництві є зменшення затрат праці,

Таблиця 1 – Основні сфери застосування мехатронних систем в системі машин для тваринництва

Тип механізованих робіт на фермі	Впровадження мехатронних систем
Утримання тварин	Розумні ворота Безпілотні літальні апарати
Забезпечення мікроклімату	Системи керування обертами вентиляторів Системи керування положенням заслінок Системи керування температурою та вологістю повітря
Кормороздавання	Стаціонарні кормороздовачі Координатні кормороздавачі Мобільні кормороздавачі Роботи-кормороздавачі Роботи-підрівнювачі Системи вимірювання ваги і розмірів тварин для коригування кількості корму
Напування	Контроль споживання води окремими тваринами
Видалення гною	Автоматичні скребкові системи Роботи для видалення гною Роботи для підгортання гною
Отримання продукції	Автоматизовані доїльні зали Роботи-дояри Роботи для збирання яєць

Джерело: розроблено авторами на підставі [1-36]

покращений контроль за механізованими процесами на фермі, покращення виконання механізованих технологічних процесів та забезпечення комфорту тварин. Тому дослідження спрямовані на розвиток та впровадження мехатронних систем в системі машин для тваринництва є актуальними і потребують подальшого розвитку.

Список літератури

1. Болтянський О.В., Болтянська Н.І., Ковальов О.О. Перспективи розвитку мехатронних систем в сільському господарстві. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв:* Матеріали МНПК, 25-26 листопада 2021 р. Харків: ДБТУ, 2021. С. 150-152.
2. Павельчук Ю., Колінчук Р. Технології у точному тваринництві. *Наука і техніка сьогодні.* 2023, №8 (22). С. 420-434. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)-420-434

3. Лебідь О.В., Кіпоренко С.С., Вовк В.Ю. Використання технологій штучного інтелекту в сільському господарстві: європейський досвід та застосування в Україні. *Електронне моделювання*. 2023. Т. 45.№ 3. С. 57-71. DOI: https://doi. org/10.15407/emodel. 45.03. 057, 2023
4. Соловей О.Ю., Лисова В.П. Перспективи розвитку галузі тваринництва в умовах цифровізації. Економічний аналіз. *Сучасні тенденції розвитку науки та освіти*: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції педагогічних та науково-педагогічних працівників, аспірантів, молодих учених 30 листопада 2021 року. Ніжин, 2021. С. 145-151.
5. Ткач В.В., Фененко А.І., Афанасьєв І.А. Перспективи техніко-технологічног озабезпечення виробництва молока на основі смарт-технологій. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. Вип. 14 (113). С. 142-150. DOI: https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-16
6. Веселов Є.В., Щербакова І.Л., Левченко І.С. Інноваційні технології у тваринництві та ефективність впровадження концепції Smart Farm. *Таврійський науковий вісник*. 2019. Вип.109.2: С.15-20. DOI https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-2.3
7. Azeta, J. et al. Application of Mechatronics in Agriculture: A review. *Journal of Physics*: Conference Series. IOP Publishing, 2019. p. 032006. DOI:10.1088/1742-6596/1378/3/032006
8. Finger R. Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*. 2023, 50.4: 1277-1309. DOI: https://doi.org/10.1093/erae/jbad021
9. Neethirajan S. Ethics of digital animal farming. *Preprints*. 2021, 2021070368. DOI: 10.20944/preprints202107.0368.v1
10. Monteiro A., Santos S.,Gonçalves P. Precision Agriculturefor Crop and LivestockFarming—Brief Review. *Animals*. 2021. 11. 2345. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11082345
11. Bellon Maurel V., Huyghe C. Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *OCL*. 2017. 24(3): D307. DOI: https://doi.org/10.1051/ocl/2017028
12. Cheng C., Fu J., Su H., Ren L. Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges. *Machines*. 2023. 11. 48. DOI: https://doi.org/10.3390/machines11010048
13. Morrone S., Dimauro C., Gambella F., Cappai M.G. Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF): An up to Date Overview across Animal Productions. *Sensors.* 2022. 22, 4319. DOI: https://doi.org/10.3390/s22124319
14. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2020. 29. 100367.DOI: https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100367
15. Rodenburg J. Success factors for automatic milking. *Precision Dairy Conference*. Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota. June 26-27, 2013. 2013. p. 22-34.
16. Simitzis P., Tzanidakis C., Tzamaloukas O., Sossidou E. Contribution of Precision Livestock Farming Systems to the Improvement of Welfare Status and Productivity of Dairy Animals. *Dairy*. 2022; 3(1)P. 12-28. DOI: https://doi.org/10.3390/dairy3010002
17. Alejandro M. Automation devices in sheep and goat machine milking. *Small Ruminant Research*. 2016. 142. P. 48–50. DOI: https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.04.004
18. Connolly A. The new Digital World of Dairy Farming – Bridging the data gap. *Precision Dairy Farming*. Proceedings of the 2nd International Precision Dairy Farming Conference. 18-20 June 2019. University of Minnesota, 2019. P. 1-7.
19. Janni K.A., Jacobson L.D. Multistage ventilation controllers: not just a thermostat. *Precision Dairy Conference*, Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota . June 26-27, 2013. 2013. P. 63-64.
20. Janni K.A., Jacobson L.D. Ventilation system demonstration trailer. *Precision Dairy Conference*. Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota . June 26-27, 2013. P. 187-188.
21. Axegard C. Individual drinking water intake of dairy cows in an AMS barn. *Degree project in Animal Science Submitted to Swedish University of Agricultural Sciences*. 2017. 42 p.
22. Ertuğrul M., Zengin K., Tarhan S. Development of a new automatic water intake measurement and recording system to monitor individual water drinking behaviors of cattle. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*. 2020, 35.2: P. 245-250. DOI: https://doi.org/10.7161/omuanajas.673790
23. Romano E, et al. Increased Cattle Feeding Precision from Automatic Feeding Systems: Considerations on Technology Spread and Farm Level Perceived Advantages in Italy. *Animals*. 2023; 13(21): 3382. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13213382
24. Grothmann A., Nydegger F., Moritz C., Bisaglia C. Automatic feeding systems for dairy cattle - potential for optimization in dairy farming. *Towards Envirmonmental Technologies.* International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010. Cemagref, Clermont-Ferrand (2010).P. 275-286.
25. Aydin A. Novel Technologies and Automation Systems In Livestock Farms. *Arch Animal Husb& Dairy Sci*. 2(3): 2021. AAHDS.MS.ID.000538. DOI: 10.33552/AAHDS.2021.02.000538.
26. Oursolutions: веб-сайт. URL: https://www.lely.com/solutions/ (датазвернення: 10.11.2023).

27. Mosquera L.Q., et al. Design of an Automated System for Cattle-Feed Dispensing in Cattle-Cows. *IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference* (UEMCON). New York, NY, USA. 2021. P. 0671-0675. DOI: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666491.
28. Ebertz P., Krommweh M.S., Büscher W. Feasibility Study: Improving Floor Cleanliness by Using a Robot Scraper in Group-Housed Pregnant Sows and Their Reactions on the New Device. *Animals*. 2019; 9(4):185. DOI: https://doi.org/10.3390/ani9040185
29. Ruud L.E., Froknestad Ø. Function of automatic manurescrapers. *10th International Livestock Environment Symposium (ILES X)*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018. p. 1. DOI:10.13031/iles.18-029
30. Науменко О.А., Палій А.П., Чигрин О.А. Застосування роботизованих систем у молочному скотарстві. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства присвячений 85-річчю університету*. 2015. Вип. 157 «Технічні системи і технології тваринництва». С. 32-38.
31. John A.J., et al. Review: Milking robot utilization, a successful precision livestock farming evolution. *Animal* 2016. 10. 1484–1492.
32. Piwczyński D., Gondek J., Sitkowska B., Kolenda M. Comparison of results coming from automatic milking system in selected countries in EUROPE and U.S. Journal of Central European Agriculture. 2020. 21.2: P. 187-196. DOI: /10.5513/JCEA01/21.2.2559
33. Tremblay M., et al. Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. *Journal of Dairy Science*. 2016. 99. 3824–3837. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2015-10152
34. Bastiaan A., et al. Path planning for the autonomous collection of eggs on floors. *Biosystems Engineering*. Vol.121. 2014. P. 186-199. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.005
35. Bastiaan A., et al. Evaluation of the performance of Poultry Bot, an autonomous mobile robotic platform for poultry houses. *Biosystems Engineering*. Vol. 174. 2018. P. 295-315, DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.015

References

1. Boltianskyi, B.V., Boltianska, N.I. & Kovalov, O.O. (2021). Perspektyvy rozvytku mekhatronnykh system v silskomu hospodarstvi [Prospects for the development of mechatronic systems in agriculture]. Modern engineering of agro-industrial and food industries: *Materialy MNPK (25-26 lystopada 2021 r.) – Materials of MNPC (pp. 150-152)* [in Ukrainian].
2. Pavelchuk, Y.F. & Kolinchuk, R.V. (2023). Tekhnolohii u tochnomu tvarynnytstvi [Technologiesinprecisionlivestock]. *Naukaitekhnikasohodni – Science and technology today*, *8 (22)*, 420-434 [in Ukrainian].
3. Lebid, O.V., Kiporenko, S.S. & Vovk, V.Yu. (2023). Vykorystannia tekhnolohii shtuchnoho intelektu v silskomu hospodarstvi: yevropeiskyi dosvid ta zastosuvannia v Ukraini [Use of artificial intelligence technologies in agriculture: european experience and application in ukraine]. *Elektronnemodeliuvannia – Electronic Modeling, Vol. 45, № 3,* 57-71 [in Ukrainian].
4. Synyavina, Yu. & Butenko, T. (2021). Perspektyvy rozvytku haluzi tvarynnytstva v umovakh tsyfrovizatsii [Prospects for the development of the livestock industry in the conditions of digitalization]. *Ekonomichnyianaliz – Economic analysis, 31.1*, 178-185 [in Ukrainian].
5. Tkach, V.V., Fenenko, A.I., Afanasiev I.A. (2021). Perspektyvy tekhniko-tekhnolohichnoho zabezpechennia vyrobnytstva moloka na osnovi smart-tekhnolohii [Prospects for technical and technological support of milk production based on smart technologies]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiiasilskohohospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture, 14 (113),* 142-150 [in Ukrainian].
6. Veselov, Ye.V., Shcherbakova, I.L. & Levchenko, I.S. (2019). Innovatsiini tekhnolohii u tvarynnytstvi ta efektyvnist vprovadzhennia kontseptsii Smart Farm [Innovative livestock technologies and the effectiveness of smart farm implementation]. *Tavriiskyinaukovyivisnyk – Taurian Scientific Bulletin, 109.2*, 15-20 [in Ukrainian].
7. Azeta, J., Bolu, C. A., Alele, F., Daranijo, E. O., Onyeubani, P., & Abioye, A. A. (2019, December). Application of Mechatronics in Agriculture: A review. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1378, No. 3, p. 032006). IOP Publishing [in English].
8. Finger, R. (2023). Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics, 50(4),* 1277-1309 [in English].
9. Neethirajan, S. (2021). Ethics of digital animal farming. *Preprints*, 2021b070368 [in English].
10. Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. *Animals, 11*, 2345 [in English].

11. Maurel, V. B., &Huyghe, C. (2017). Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *Ocl, 24(3)*, D307 [in English].
12. Cheng, C., Fu, J., Su, H., & Ren, L. (2023). Recent advancements in agriculture robots: Benefits and challenges. *Machines, 11(1)*, 48 [in English].
13. Morrone, S., Dimauro, C., Gambella, F., &Cappai, M. G. (2022). Industry 4.0 and precision livestock farming (PLF): an up to date overview across animal productions. *Sensors, 22(12),* 4319 [in English].
14. Neethirajan, S. (2020). The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensing and Bio-Sensing Research, 29,* 100367 [in English].
15. Rodenburg, J. (2013, June). Success factors for automatic milking. In *Precision Dairy Conference, Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota* (pp. 22-34) [in English].
16. Simitzis, P., Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., & Sossidou, E. (2021). Contribution of Precision Livestock Farming systems to the improvement of welfare status and productivity of dairy animals. *Dairy, 3(1),* 12-28 [in English].
17. Alejandro, M. (2016). Automation devices in sheep and goat machine milking. *Small Ruminant Research, 142,* 48-50 [in English].
18. Connolly, A. (2019). The new Digital World of Dairy Farming – Bridging the data gap. *Precision Dairy Farming. Proceedings of the 2nd International Precision Dairy Farming Conference.18-20 June 2019. University of Minnesota*, (pp. 1-7) [in English].
19. Janni, K.A. & Jacobson, L.D. (2013, June). Multistage ventilation controllers: not just a thermostat. In *Precision Dairy Conference, Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota* (pp. 63-64) [in English].
20. Janni, K.A. & Jacobson, L.D. (2013, June). Ventilation system demonstration trailer. *In Precision Dairy Conference, Mayo Civic Center, Rochester, Minnesota* (pp. 187-188) [in English].
21. Axegard, C. (2017). Individual drinking water intake of dairy cows in an AMS barn. *Degree project in Animal Science Submitted to Swedish University of Agricultural Sciences* [in English].
22. Ertuğrul, M., Zengin, K., & Tarhan, S. (2020). Development of a new automatic water intake measurement and recording system to monitor individual water drinking behaviors of cattle. *AnadoluTarımBilimleriDergisi, 35(2),* 245-250 [in English].
23. Romano, E., Brambilla, M., Cutini, M., Giovinazzo, S., Lazzari, A., Calcante, A., ...& Bragaglio, A. (2023). Increased Cattle Feeding Precision from Automatic Feeding Systems: Considerations on Technology Spread and Farm Level Perceived Advantages in Italy. *Animals, 13(21),* 3382 [in English].
24. Grothmann, A., Nydegger, F., Moritz, C. & Bisaglia, C. (2010). Automatic feeding systems for dairy cattle - potential for optimization in dairy farming. *International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010: Towards Envirmonmental Technologies* [in English].
25. Aydin, A. (2021). Novel Technologies and Automation Systems In Livestock Farms. *Arch Animal Husb& Dairy Sci. 2(3):*. AAHDS.MS.ID.000538 [in English].
26. Oursolutions. Retrievedfrom. *lely.com.* Retrieved from https://www.lely.com/solutions/ [in English].
27. Mosquera, I.L.Q., Fierro, J.E.R., Zacarias, J.R.O., Montero, J.B., Quijano, S.A.C., & Huamanchahua, D. (2021, December). Design of an Automated System for Cattle-Feed Dispensing in Cattle-Cows. In *2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)* (pp. 0671-0675). IEEE [in English].
28. Ebertz, P., Krommweh, M. S., &Büscher, W. (2019). Feasibility study: improving floor cleanliness by using a robot scraper in group-housed pregnant sows and their reactions on the new device. *Animals, 9(4),* 185 [in English].
29. Ruud, L.E., & Froknestad, Ø. (2018). Function of automatic manure scrapers. In *10th International Livestock Environment Symposium (ILES X)* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers [in English].
30. Naumenko, O.A., Palii, A.P. & Chyhryn, O.A. (2015). Zastosuvanniarobotyzovanykhsystem u molochnomuskotarstvi [Application of robotic systems indairy farming]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskohohospodarstva prysviachenyi 85-richchiu universytetu – The Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture is dedicatedto the 85th anniversary of the university, 157,* 32-38 [in Ukrainian].
31. John, A. J., Clark, C. E. F., Freeman, M. J., Kerrisk, K. L., Garcia, S. C., & Halachmi, I. (2016). Review: milking robot utilization, a successful precision livestock farming evolution. *Animal 10*. 1484–1492 [in English].
32. Piwczyński, D., Gondek, J., Sitkowska, B., & Kolenda, M. (2020). Comparison of results coming from automatic milking system in selected countries in Europe and US. *Journal of Central European Agriculture, 21(2)*, 187-196 [in English].

33. Tremblay, M., Hess, J. P., Christenson, B. M., McIntyre, K. K., Smink, B., van der Kamp, A. J., ... & Döpfer, D. (2016). Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. *Journal of Dairy Science, 99(5)*, 3824-3837 [in English].
34. Vroegindeweij, B. A., van Willigenburg, G. L., Koerkamp, P. W. G., & van Henten, E. J. (2014). Path planning for the autonomous collection of eggs on floors. *Biosystems engineering, 121*, 186-199 [in English].
35. Vroegindeweij, B. A., Blaauw, S. K., IJsselmuiden, J. M., & van Henten, E. J. (2018). Evaluation of the performance of PoultryBot, an autonomous mobile robotic platform for poultry houses. *Biosystems engineering, 174*, 295-315 [in English].

Vasyl Kravchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Voitik,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Application of Mechatronic Systems in the System of Machines for Animal Husbandry

The purpose of this work is the systematization of research and implementation of mechatronic systems in the system of machines for keeping, caring for and obtaining the primary products of animal husbandry.

The use of mechatronic systems in keeping animals and poultry, providing a microclimate, watering, feeding, removing manure and obtaining products is considered. The development of mechatronic systems in the animal husbandry system involves controlling the movement of animals through the farm, which is mainly provided by pre-selection gates. Unmanned aerial vehicles can also be used for animal monitoring when animals are kept out on pasture. To ensure the proper microclimate in modern ventilation systems, programmable multi-stage controllers are used to control the ventilation equipment. Introduction of elements of mechatronic systems into animal watering, there was a means of controlling the consumption of water individually by each animal. The application of mechatronic systems is also in stationary feed distribution systems, in mobile systems such as self-propelled or coordinate mixer dispensers, feed pushers, as well as in systems for recognizing the weight and size of animals to automatically change the amount of feed given to individual animals. The implementation of mechatronic systems in manure removal systems is realized in automated scraper systems and in mobile manure cleaning robots. There are also machines for milking and collecting eggs equipped by mechatronic systems.

Conducted research shows that almost all mechanized processes of keeping, care and obtaining products in livestock and poultry farming use mechatronic systems, which already either have specific design solutions and are used on farms or are still at the stages of development and research. The main driving force behind the introduction of mechatronic systems in animal husbandry is the reduction of labor costs, improved control over mechanized processes on the farm, improvement of the performance of mechanized technological processes and ensuring the welfare of animals.

mechatronic systems, machines for animal husbandry, keeping of animals, care, primary production

Одержано (Received) 10.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.372 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.186-196

О.І. Біловод, доц., канд. техн. наук, **В.В. Падалка,** доц., канд. техн. наук, **О.А. Бурлака,** доц., канд. техн. наук
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
e-mail: mech@pdaa.edu.ua

Оновлення тракторного парку Полтавської області, аналіз та перспективи

Наведено результати досліджень за якісними та кількісними характеристиками придбаних та зареєстрованих тракторів, що відображені у єдиному реєстрі для ведення автоматизованого обліку відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області за період з 2018 року по 2023 рік. Обґрунтовані тенденції оновлення тракторного парку, заміни тракторів, рекомендовані шляхи удосконалення організаційно-технічних механізмів забезпечення тракторами підприємств та фізичних осіб, зумовлених воєнним станом.
трактори, реєстрація, аналіз, динаміка, прогнозування, оновлення

Постановка проблеми. Технічне забезпечення агропромислового виробництва в Полтавській області є одною з важливих складових стабільного економічного розвитку України. В наш час все більшої вагомості набуває народно-господарська проблема якісного та кількісного матеріально-технічного забезпечення сільськогосподарського виробництва. З огляду на існуючий воєнний час, така проблема не тільки не зменшує своєї вагомості, але й постійно спонукає до пошуку нових механізмів оновлення тракторного парку.

Надскладна економічна ситуація сьогодення в сільськогосподарському виробництві зумовлена тим, що мають місце значні труднощі, пов’язані з експортом сільськогосподарської продукції на зовнішній ринок. Також, спостерігається значне зростання, майже в півтора рази, вартості імпортної сільськогосподарської техніки, зокрема тракторів загального та спеціального призначення, а також їх комплектуючих. Відповідно, умови сьогодення для сучасного аграрного виробництва характеризуються виникненням високого диспаритету цін між ринковою вартістю сільськогосподарської продукції, особливо на внутрішньому ринку споживання України, та ціною технічних засобів виробництва, в тому числі тракторів, внаслідок чого складається ситуація, де саме виробництво сільськогосподарської продукції стає неможливим.

Але, враховуючи вагомість аграрного сектору економіки у формуванні харчової безпеки держави, навіть у таких скрутних умовах, аграрії знаходяться в постійному пошуку, адаптації та віднаходять шляхи виходу з кризової ситуації сьогодення. Відповідно можливо зазначати, що обраний напрямок нашого дослідження – аналіз та прогноз стану оновлення машинно-тракторного парку Полтавської області в умовах сьогодення, є особливо актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні вектори, стратегія та перспективи забезпечення сільського господарства України сучасною сільськогосподарською технікою та розвиток системи інженерно-технічного забезпечення охарактеризована Законами України [1, 2]. В таких нормативно-правових документах акцентовано увагу на розвиток вітчизняного машинобудування та, зокрема,

© О.І. Біловод, В.В. Падалка, О.А. Бурлака, 2023

тракторобудування, підготовку висококваліфікованих фахівців інженерно-технічних спеціальностей для удосконалення системи технічного забезпечення та технічного сервісу машинно-тракторного парку в агропромисловому комплексі.

Питання щодо основних тенденцій розвитку галузі вітчизняного машинобудування висвітлено у роботі провідних науковців [3, 4]. Вагомими складовими можливо охарактеризувати дослідження механізмів та системи інвестування в сільськогосподарські машини, матеріально-технічне забезпечення аграрного виробництва з урахуванням досвіду інших країн. Такі дослідження містять наукові роботи [5, 6]. Фінансово-інвестиційна підтримка аграрного виробництва за рахунок залучення зовнішніх інвестицій та економічні моделі до їх реалізації розглянута в публікаціях [7, 8]. Матрична модель та її особливості щодо оцінки інвестиційної привабливості сільськогосподарських підприємств розглянуто у [9]. Порівняння інвестиційної моделі на прикладі Української економіки викладено у наукових статтях [10, 11]. Оцінка сучасного стану забезпеченості сільськогосподарських підприємств Харківської області матеріально-технічними ресурсами, їх переваги і недоліки, виробничій досвід висвітлено у [12]. Ринок тракторів в Україні в довоєнному періоді, тенденції його розвитку, проблематику забезпечення тракторами аграрного виробництва розкрито у [13]. У праці [14] ґрунтовно описана та досліджена технологічна блочно-варіантна система машиновикористання в землеробстві України. Основні етапи розвитку вітчизняного тракторобудування, позитивні моменти, виробничий досвід викладено у історичному нарисі [15]. Також багато наукових праць присвячено оцінці сучасного ринку тракторної та сільськогосподарської техніки в Україні, визначенню механізмів удосконалення організаційної та фінансової складової такого напряму дослідження [16, 17]. Тенденції щодо попиту на сільськогосподарську техніку підвищеної продуктивності розглянуто у [18].

Але, при цьому, значна частина науково обґрунтованих стратегій, що пропоновані до аналізу за причиною воєнних дій, і не тільки, потребують корегування, подальшого розвитку та проведення додаткових досліджень в такому напрямку.

Постановка завдання. Метою дослідження є удосконалення організаційно-технічних механізмів щодо оновлення тракторного парку підприємств та фізичних осіб Полтавської області з урахуванням сучасних тенденцій та трансформацій економіки регіону, зумовлених воєнним станом.

Виклад основного матеріалу. Вихідними даними для аналітичної частини дослідження слугують кількісні та якісні характеристики придбаних та зареєстрованих тракторів за досліджуваний період з 2018 року по 2023 рік, що відображені у єдиному реєстрі для ведення автоматизованого обліку тракторів, відповідно до [19], відділу реєстрації сільськогосподарської техніки головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області.

До досліджуваних факторів нами віднесено наступні характеристики:

1. Рік реєстрації тракторів, що визначений як часовий термін від моменту подання документів до єдиного реєстру ведення автоматизованого обліку тракторів відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області.

2. Суб’єкти, що реєструють тракторну техніку, поділені та класифіковані за трьома умовними групами: приватні особи; аграрні підприємства, підприємства, що ведуть іншу господарську діяльність.

За результатами статистичного аналізу даних, виконаного з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel, з єдиного реєстру для ведення

автоматизованого обліку тракторів відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області, нами здійснено математичну обробку до визначення динаміки, тенденцій та прогнозу оновлення тракторної техніки.

На рис.1 наведено динаміку та прогноз щодо реєстрації тракторів та тракторної техніки в Полтавській області за 2018–2023 роки дослідження.

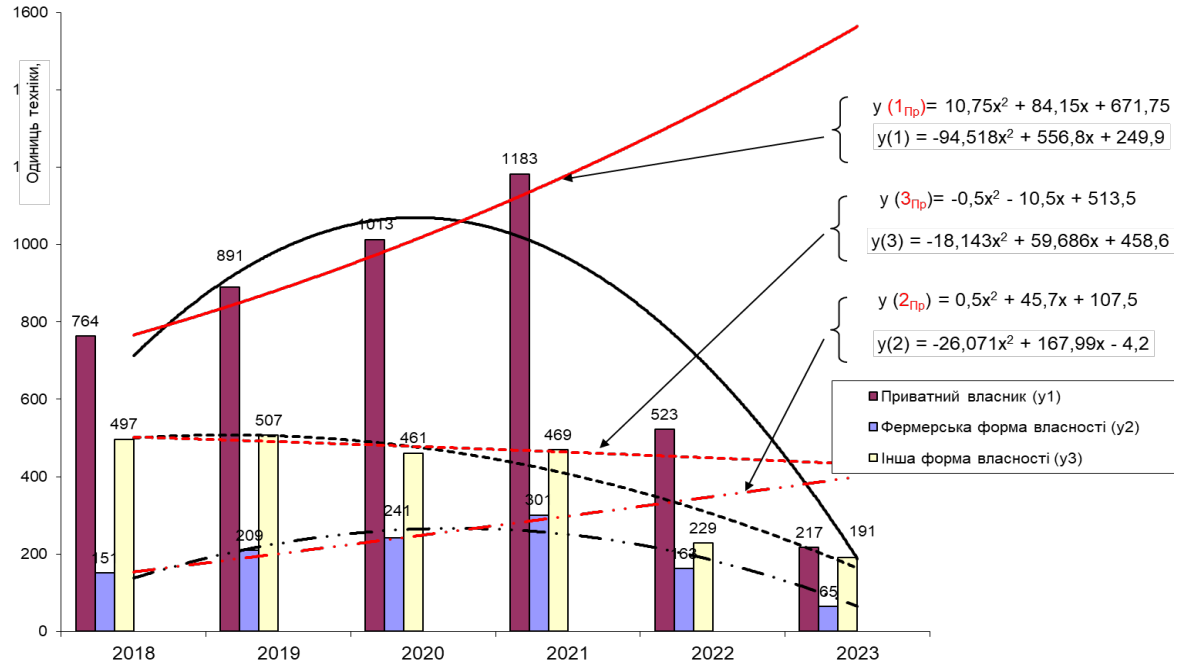


Рисунок 1 – Динаміка та прогноз реєстрації тракторної техніки в Полтавському регіоні за 2018–2023 роки. $y(1,2,3)$ – дійсні значення, $y(1_{Пр}, 2_{Пр}, 3_{Пр})$ –прогнозовані значення

Джерело: розроблено авторами за даними єдиного реєстру для ведення автоматизованого обліку відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області

Як видно з даного графіка, з 2018 року по 2021 роки досліджуваного періоду спостерігається чітка тенденція узагальненого тренду другого порядку до стабільного зростання кількості придбаної техніки по всім трьом групам дослідження. Згідно з отриманих статистичних даних визначено, що максимальну кількість придбаної тракторної техніки було зареєстровано у 2021 році. Такі показники склали: 1183 одиниці зареєстровано приватними особами, 301 одиниця – реєстраторами є аграрії, 469 тракторів реєстрували інші підприємства. Тобто, економічний розвиток сільського господарства та промисловості Полтавської області в довоєнний період спонукав як до зростання попиту на розширення тракторного парку, так і до наявності фінансових можливостей по реалізації та задоволенню такого попиту.

Різким скороченням динаміки оновлення та реєстрації тракторів та тракторної техніки відзначився 2022 рік. Початок повномасштабного вторгнення в Україну та подальші військові події призвели до того, що оновлення тракторного парку Полтавського регіону скоротилося більш ніж у два рази.

Початок та середина 2023 року погіршує активність ринку придбаної тракторної техніки в Полтавській області також майже у два рази, хоч дані 2023 року не є остаточними, ситуація може бути частково виправлена після збирання пізніх зернових культур та реалізації аграрними підприємствами частини сільськогосподарської

продукції. Також сподіваємося на поновлення роботи зернових коридорів з українського експорту аграрної продукції.

За результатами статистичного аналізу, виконаного з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel, встановлено, що за 2022–2023 роки відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки приватними власниками (*y*1) на 50,71% та 87,97% що у порівнянні з прогнозованою тенденцією, яка сформувалася у попередні роки відображає прямі втрати в економічному розвитку цих підприємців. Подібна ситуація склалася і у фермерських господарствах, де зменшення кількості одиниць зареєстрованих техніки (*y*2) в порівнянні з прогнозованим склала 47,21% та 83,69% відповідно. Інші суб'єкти господарської діяльності (y3) мають показники втрат 32,34% та 62,18% відповідно за 2022 та 2023 роки.

Не менш болюча тема – це результати дослідження динаміки співвідношення використання закордонних тракторів та тракторів вітчизняного виробництва (рис.2).

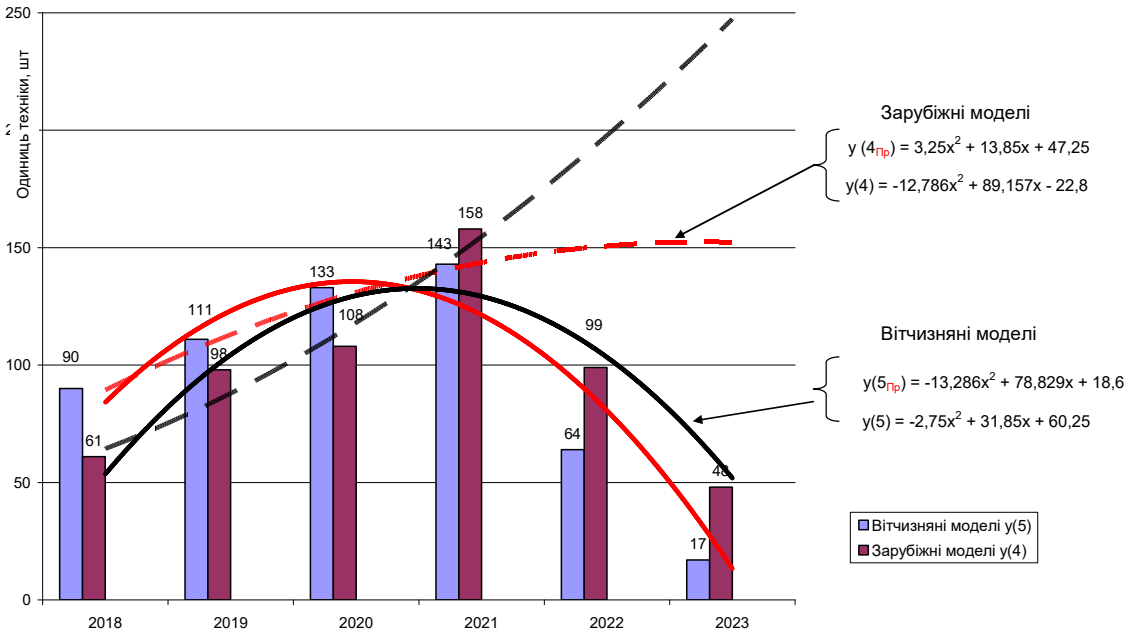


Рисунок 2 – Порівняльний аналіз (за походженням техніки) динаміки та прогнозу оновлення тракторного парку фермерськими господарствами в довоєнний період та під час війни. *y*(4,5) – дійсні значення, *y*($4_{Пр}$, $5_{Пр}$) –прогнозовані значення

Джерело: розроблено авторами за даними єдиного реєстру для ведення автоматизованого обліку відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області

Не є якоюсь таємницею, що за основними технічними та технологічними характеристиками, більша частина сучасної тракторної техніки, виробництва провідних закордонних фірм, має значні переваги. Останнє спонукає до прийняття техніко-організаційних рішень підприємствами різних форм власності та фізичними особами по закупівлі значної частини тракторної техніки закордонного виробництва.

Склалася ситуація, що кількість закордонних одиниць техніки у 2022 році так і переважаючій частині 2023 року перевищила реєстраційну частку, відносно тракторів вітчизняного виробництва, майже у три рази.

За результатами статистичного аналізу встановлено, що за 2022–2023 роки відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки закордонного

виробництва ($y4$) на 47,74% та 79,04%, що у порівнянні з прогнозованою тенденцією, яка сформувалася у попередні роки, відображає прямі втрати в оновленні основних засобів сільськогосподарського виробництва.

Слід відмітити, що відбулося часткове товарозаміщення імпортованої техніки вітчизняною ($y5$). Так за 2022 та 2023 роки відбулося збільшення на 46,54% та 91,28% відповідно, кількості зареєстрованих одиниць техніки вітчизняних товаровиробників (можливо, у першу чергу за рахунок перереєстрації вживаної техніки).

Описані наявні тенденції відносно задоволення виробничого попиту тракторами закордонного виробництва підприємств та фізичних осіб Полтавського регіону у довоєнний період були більш збалансовані в порівнянні з тракторами вітчизняного виробництва, тобто вітчизняне машинобудування тракторної техніки мало стабільний розвиток, і, відповідно, свій зростаючий ринок збуту.

Різкий дисбаланс в сторону переваги придбання та реєстрації тракторної техніки закордонного виробництва відбувся під час проведення повномасштабних воєнних дій в Україні. Така ситуація, нажаль, додатково досить потужно гальмує розвиток вітчизняного машинобудування, і поглиблює проблему технічного сервісу придбаних тракторів зарубіжного виробництва.

Необхідно враховувати, що частина цих імпортованих тракторів завозиться на ринок України вживаними, з частково використаним ресурсом. Такі трактори дешевші від нових, але вартість їх утримання та використання зростає за рахунок збільшення ремонтно-сервісних робіт. Озвучена ситуація є проблемною і через нестачу кваліфікованих сервісних інженерів, і через дорожнечу сервісного обслуговування тракторів та високу вартість запчастин до імпортної техніки. Навіть за умови фінансової спроможності купувати імпортні запчастини до тракторів, час виконання деяких замовлень може значно зрости за причиною перегрупування логістичних шляхів постачання імпортних товарів в Україну.

Необхідно зазначити, щодо імпортної техніки, то маємо досить різноманітну розгалужену пропозицію на зовнішніх ринках чи аукціонах тракторної техніки. Така ситуація призводить до того, що значна частина потенційних власників тракторної техніки в Україні купує різноманітні моделі за умови дешевшої ціни. Тому маємо в одному підприємств техніку різних виробників, різних вікових категорій, різної складності і використаного ресурсу. Ефективно використовувати і здійснювати технічний сервіс такого тракторного парку досить обтяжливо, і у більшості випадків економічно складно чи недоцільно.

Більш детально розглянемо абсолютні показники щодо вікового розподілу придбаних та зареєстрованих у Полтавській області тракторів за період 2018–2023 роки фермерськими господарствами регіону. Динаміку такого розподілу подано на рис.3.

За результатами дослідження, позитивним моментом є те, що у вікових групах тракторної техніки переважають нові трактори, термін використання останніх не перевищує три роки. Найбільша кількість нової техніки була придбана у 2021 році – 237шт. Динаміка щодо придбання та реєстрації тракторів з 2018 р. по 2021р. має чіткий тренд до зростання. Щодо абсолютних кількісних показників такого порівнювального періоду, маємо збільшення у два і більше рази.

Роки повномасштабних бойових дій – 2022 рік та 2023 рік можливо охарактеризувати надскладними відносно економічного розвитку Полтавського регіону. Маємо важке становище, складні умови виробничої діяльності в аграрному секторі та промисловості в цілому. Тому, як наслідок вищесказаного, спостерігається зменшення майже двічі за 2022 р. та 2023 р. загальної кількості зареєстрованих

тракторів. Але у такому випадку позитивними моментами є відносне співвідношення в бік значної переваги кількості нових машин тракторного парку.

При більш детальному дослідженні ліній тренду, що представлені на поданих графіках (рис.1–3) поліномами другого ступеня за фактичними даними з 2018 року по 2023 рік, по всім досліджуваним групам реєстрованих тракторів та тракторної техніки, маємо від'ємні коефіцієнти при незалежній змінній другого порядку. Результати такої регресійної моделі є наслідком, що підтверджують і доводять закономірності різкого зменшення купівельної спроможності суб'єктів господарювання різних форм власності в період воєнного стану.

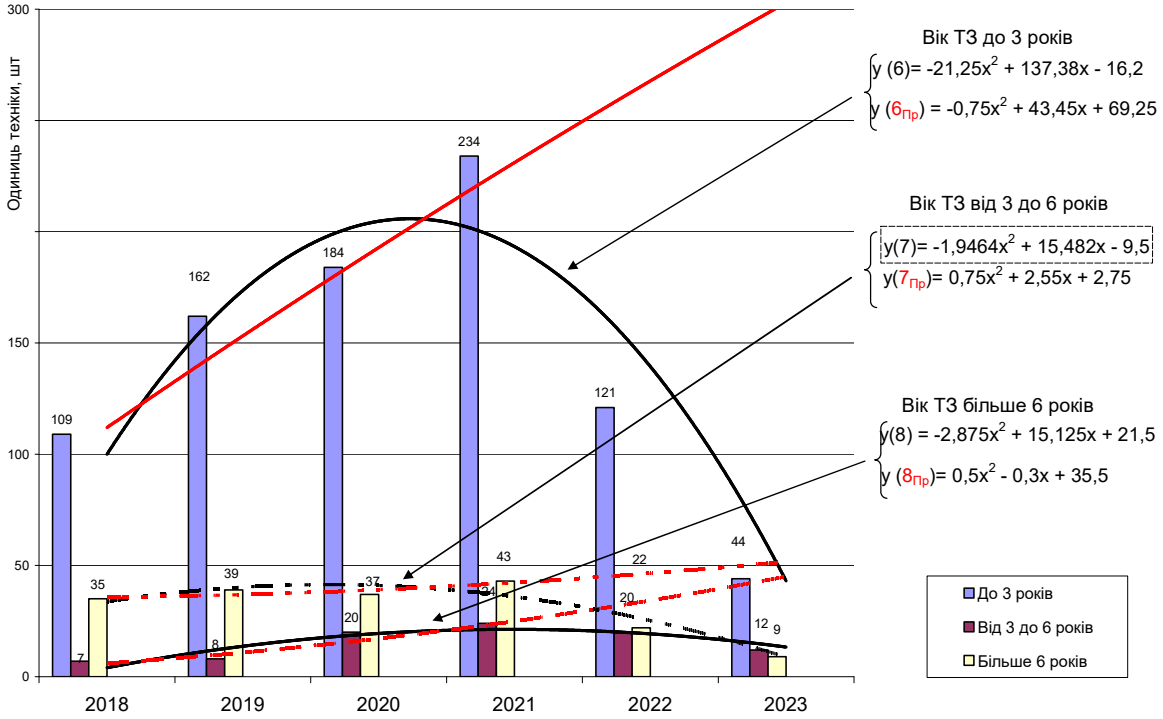


Рисунок 3 – Порівняльний аналіз (за віком техніки) динаміки та прогнозу оновлення тракторного парку фермерськими господарствами в довоєнний період та під час війни
y(6,7,8) – дійсні значення, y($6_{Пр}$, $7_{Пр}$, $8_{Пр}$) –прогнозовані значення

Джерело: розроблено авторами за даними єдиного реєстру для ведення автоматизованого обліку відділу реєстрації сільськогосподарської техніки Головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області

За результатами статистичного аналізу встановлено, що за 2022–2023 роки відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки з наробітком до 3 років (*y*6) на 47,92% та 85,78% що у порівнянні з прогнозованою тенденцією, яка сформувалася у попередні роки відображає зменшення обсягів ввезення в Україну нової техніки. Вочевидь порівняно невисокий показник 2022 року сформувався у зв'язку з виконанням договорів та контрактів попередніх років. Не краща ситуація з технікою, що мають наробіток від 3 до 6 років (*y*7). Показники скорочення від прогнозованих склали 43,83% та 70,46% відповідно до років. Техніка старше 6 років (*y*8) також має тенденцію то різкого скорочення обсягів, на 45,76% та 83,13% відповідно до 2022 та 2023 років.

Аналізуючи отримані результати, статистично доведено, що у Полтавському регіоні існує обґрунтована тенденція до зменшення обсягів реєстрації техніки фермерськими господарствами як за кількісними, так і за якісними (віковими)

показниками. Оновлення техніки відбувається переважно за рахунок її перереєстрації між власниками. Переважає вживана техніка, існує небезпека старіння основних засобів виробництва.

Для покращення ситуації по висвітленим проблемам, крім досягнення основної стратегічної мети – закінчення війни, можливо запропонувати наступні рекомендації:

Суб'єктам господарювання різних форм власності, що формують попит на трактори та тракторну техніку, звернути більшу увагу на ринок тракторів вітчизняного виробництва. Технічне відставання вітчизняних тракторобудівників порівняно із закордонною технікою можливо частково подолати створенням та розвитком сумісних підприємств по виробництву такої техніки. Варто лобіювати та просувати можливість державної підтримки, хоча ми розуміємо, що маємо державний бюджет воюючої країни, і відповідний дефіцит державного бюджету також.

Якщо власник тракторів віддав перевагу імпортній техніці, то доцільно, практично і науково обґрунтовано купувати техніку одного виробника чи одного бренду. В такому випадку полегшується вирішення питань з ефективним використанням тракторів та організацією технічного обслуговування та ремонту. При цьому, надійний дилер (дистриб'ютор) тракторів та тракторної техніки є вагомим чинником щодо прийняття управлінського господарського рішення по придбанню машин того чи іншого бренду.

Як це не важко, але пошук внутрішніх резервів – це дієвий шлях використання, обслуговування та відновлення працездатності вже придбаної техніки. Відомий історичний досвід [15] по створенню та експлуатації машинно-тракторних станцій, дав змогу більш ефективно використовувати трактори та концентрувати в центрах їхнього обслуговування та ремонту відповідне ремонтно-діагностичне обладнання та висококваліфікований персонал. В наш час відродження машинно-тракторних станцій неможливо здійснити через різні форми власності суб'єктів господарювання – власників тракторів і тракторної техніки, але при цьому є позитивний досвід міжгосподарської кооперації.

В аграрному секторі доцільно звернути особливу увагу на енергоощадні технології. Використання тракторів та іншої сільськогосподарської техніки на енергоємних операціях (глибоке розпушування ґрунту, оранка, глибоке дискування…) слід уникати, заміщуючи їх відповідними біологічними технологіями, впровадженими у передових підприємствах зі світовим досвідом.

Для відновлення та домінування на ринку тракторів вітчизняних моделей, машинобудівним підприємствам, крім реконструкції технологічної бази та обладнання, необхідно освоєння нових технологій тракторобудування з урахуванням досвіду провідних світових виробників та впровадження сучасних домінуючих стратегій економічного розвитку.

Висновки. За результатами наукового дослідження статистичних даних, що відображені у єдиному реєстрі для ведення автоматизованого обліку тракторів [19] відділу реєстрації сільськогосподарської техніки головного управління Держпродспоживслужби в Полтавській області з 2018 року по 2021 рік спостерігається чітка тенденція узагальненого тренду до стабільного зростання кількості придбаної техніки по всім трьом обраним групам дослідження. Так, наприклад, максимальну кількість придбаної техніки було зареєстровано у 2021 році – 1183 одиниці зареєстровано приватними особами, 301 одиниця – реєстраторами є аграрії, 469 тракторів реєстрували інші підприємства.

За 2022–2023 роки відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки приватними власниками на 50,71% та 87,97% що у порівнянні з прогнозованою

тенденцією, яка сформувалася у попередні роки відображає прямі втрати в економічному розвитку цих підприємців. Подібна ситуація склалася і у фермерських господарствах, де зменшення кількості одиниць зареєстрованих техніки в порівнянні з прогнозованим склало 47,21% та 83,69% відповідно. Інші суб'єкти господарської діяльності мають показники втрат 32,34% та 62,18% відповідно за 2022 та 2023 роки.

Встановлено, що за 2022–2023 роки відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки закордонного виробництва на 47,74% та 79,04% що у порівнянні з прогнозованою тенденцією, яка сформувалася у попередні роки відображає прямі втрати в оновленні основних засобів сільськогосподарського виробництва.

Слід відмітити, що відбулося часткове товарозаміщення імпортованої техніки вітчизняною. Так за 2022 та 2023 роки відбулося збільшення на 46,54% та 91,28% відповідно, кількості зареєстрованих одиниць техніки вітчизняних товаровиробників (можливо, у першу чергу за рахунок перереєстрації вживаної техніки).

Відбулося значне скорочення кількості зареєстрованої техніки з наробітком до 3 років на 47,92% та 85,78%, що у порівнянні з прогнозованою тенденцією, яка сформувалася у попередні роки відображає зменшення обсягів ввезення в Україну нової техніки. Вочевидь порівняно невисокий показник 2022 року сформувався у зв'язку з виконанням договорів та контрактів попередніх років. Не краща ситуація з технікою, що має наробіток від 3 до 6 років. Показники скорочення від прогнозованих склали 43,83% та 70,46% відповідно до років. Техніка старше 6 років також має тенденцію то різкого скорочення обсягів, на 45,76% та 83,13% відповідно до 2022 та 2023 років.

Для відновлення та домінування на внутрішньому ринку, крім реконструкції технологічної бази та обладнання, машинобудівним підприємствам необхідно освоєння нових технологій тракторобудування з урахуванням досвіду провідних світових виробників та впровадження сучасних домінуючих стратегій економічного розвитку.

Список літератури

1. Закон України „Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу" від 07.02.2002 р. № 3023. URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3023–14 (дата звернення: 04.10.2023).
2. Закон України „Про систему інженерно-технічного забезпечення агропромислового комплексу України" від 05.10.2001 р. № 2658 URL: http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/229–16.
3. Beshun O., Achkevych V., Chuba S. Analysis of the development sectors of agricultural machinery agricultural machinery. *Pratsi Tavriiskoho Derzhavnoho Ahrotekhnolohichnoho Universytetu*. 2018. 18 (2). 237–246. doi: http://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-237-246
4. Duan Y.P., Pan H., Zhang Y., Li T.H. Research on the Investment Management of Agricultural Machinery Based SPSS. *Applied Mechanics and Materials.* 2014. 687–691. 5177–5180. doi: http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.687-691.5177
5. Wieliczko B. Investment in machinery, equipment and means of transport in Polish agriculture, 2009–2012: example of FADN region 785 (Pomorze i Mazury). *Studies in Agricultural Economics.* 2015. 117 (1). 43–49. doi: http://doi.org/10.7896/j.1506
6. Lisa S., Perrine T., Jacky M., James O. Impacts of Fiscal Reforms on Country Attractiveness. *Investment Claims*. 2013. doi: http://doi.org/10.1093/lawiic/9780199983025.016.0008
7. Hadrich C., Larsen, J., Olson, R. E. F. Impact of the Section 179 tax deduction on machinery investment. *Agricultural Finance Review*. 2013. 73 (3). 458–468. doi: http://doi.org/10.1108/afr-07-2012-0035
8. Myniv R.M. Methodical approaches to the assessment of investment attractiveness of agricultural enterprises. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2019. 21 (93). 63–69. doi: http://doi.org/10.32718/nvlvet-e9313
9. Vinichenko I., Shutko T. The matrix model for assessing the investment attractiveness of agricultural enterprises. Baltic Journal of Economic Studies. 2019. 5 (3). 9. doi: http://doi.org/10.30525/2256-0742/2019-5-3-9-16

10. Kolesnik Y., Dobrovolska O., Malyuta I., Petrova A., Shulyak S. The investment model of fixed assets renovation in the agricultural industry: case of Ukraine. *Investment Management and Financial Innovations*. 201). 16 (4). 229–239. doi: http://doi.org/10.21511/imfi.16(4).2019.20
11. Akram N., Akram M. W., Hongshu W. Study on the Socioeconomic Factors Affecting Adoption of Agricultural Machinery. *Journal of Economics and Sustainable Development*. 2020. 11 (3). doi: http://doi.org/10.7176/jesd/11-3-07
12. Науменко В.О., Науменко І.В. Оцінка сучасного стану забезпеченості сільськогосподарських підприємств Харківської області матеріально-технічними ресурсами. *Вісник Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва. Серія: Економічні науки*. 2013. Вип. 6. С. 139–145.
13. Грицишин М., Перепелиця Н. Ринок тракторів в Україні . *Пропозиція : Спецвипуск. Сучасна техніка для сучасного аграрія.* 2017. С. 4–6.
14. Технологічна блочно-варіантна система машиновикористання в землеробстві України : монографія. Ч. 1. / Ю.І. Ковтун та ін. Х. : ТОВ Планета-Принт, 2020. 204 с.
15. Лупаренко Г.В. Становлення тракторобудування в Україні : монографія. Держ. Політехн. музей при НТУУ «КПІ» ; Центр пам'яткознавства НАН України і УТОПІК. Ніжин : ПП Лисенко М.М., 2015. 176 с.
16. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України №29 від 22.01.2013. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0243-13#Text (дата звернення: 12.10.2023).
17. Gorb Oleg et al. Strengthening Competitiveness of the National Economy by Inhancing Energy Efficiency and Diversifying Energy Supply Sources in Rural Areas. *Journal of Environmental Management and Tourism*, [S.l.]. 2020. Vol. 11, 5, 1114-1123, doi: https://doi.org/10.14505//jemt.v11.5(45).09.
18. Бурлака О. А., Яхін С. В., Падалка В. В., Бурлака А. О. 100 тон за годину, а що далі? Порівнюємо та аналізуємо характеристики флагманських моделей високопродуктивних зернозбиральних комбайнів. *Scientific Progress & Innovations.* 2021. No 3. С. 274–288. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34

References

1. Zakon Ukrajiny „Pro stymuljuvannja rozvytku vitčyznjanoho mašynobuduvannja dlja ahropromyslovoho kompleksu" vid 07.02.2002 r. # 3023 [Law of Ukraine "On stimulating the development of domestic engineering for the agro-industrial complex" dated February 7, 2002]. *zakon4.rada.gov.ua.* Retrieved from http://zakon4.rada.gov.ua/laws/šow/3023-14 [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrajiny „Pro systemu inženerno-texničnoho zabezpečennja ahropromyslovoho kompleksu Ukrajiny" vid 05.10.2001 r. # 2658 [Law of Ukraine "On the system of engineering and technical support of the agro-industrial complex of Ukraine" dated October 5, 2001 No. 2658]. *zakon4.rada.gov.ua.* Retrieved from http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/229-16 [in Ukrainian].
3. Beshun, O., Achkevych, V. & Chuba, S. (2018). Analysis of the development sectors of agricultural machinery agricultural machinery *Pratsi Tavriiskoho Derzhavnoho Ahrotekhnolohichnoho Universytetu*, 18 (2), 237–246. doi: http://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-237-246 [in English].
4. Duan, Y. P., Pan, H., Zhang, Y. & Li, T. H. (2014). Research on the Investment Management of Agricultural Machinery Based SPSS. *Applied Mechanics and Materials*, 687–691, 5177–5180. doi: http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.687-691.5177 [in English].
5. Wieliczko, B. (2015). Investment in machinery, equipment and means of transport in Polish agriculture, 2009–2012: example of FADN region 785 (Pomorze i Mazury). *Studies in Agricultural Economics*, *117 (1)*, 43–49. doi: http://doi.org/10.7896/j.1506 [in English].
6. Lisa, S., Perrine, T., Jacky, M. & James, O. (2013). Impacts of Fiscal Reforms on Country Attractiveness. *Investment Claims*. doi: http://doi.org/10.1093/lawiic/9780199983025.016.0008 [in English].
7. Hadrich C., Larsen, J. & Olson, R. E. F. (2013). Impact of the Section 179 tax deduction on machinery investment. *Agricultural Finance Review*, *73 (3),* 458–468. doi: http://doi.org/10.1108/afr-07-2012-0035 [in English].
8. Myniv, R.M. (2019). Methodical approaches to the assessment of investment attractiveness of agricultural enterprises. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies, 21 (93)*, 63–69. doi: http://doi.org/10.32718/nvlvet-e9313 [in English].
9. Vinichenko, I. & Shutko, T. (2019). The matrix model for assessing the investment attractiveness of agricultural enterprises. *Baltic Journal of Economic Studies, 5 (3),* 9. doi: http://doi.org/10.30525/2256-0742/2019-5-3-9-16 [in English].

10. Kolesnik, Y., Dobrovolska, O., Malyuta, I., Petrova, A. & Shulyak, S. (2019). The investment model of fixed assets renovation in the agricultural industry: case of Ukraine. *Investment Management and Financial Innovations,* 16 (4), 229–239. doi: http://doi.org/10.21511/imfi.16(4).2019.20 [in English].
11. Akram, N., Akram, M. W., Hongshu, W. (2020). Study on the Socioeconomic Factors Affecting Adoption of Agricultural Machinery. *Journal of Economics and Sustainable Development*, 11 (3). doi: http://doi.org/10.7176/jesd/11-3-07 [in English].
12. Naumenko, V.O., Naumenko, I.V. (2013). Otsinka suchasnoho stanu zabezpechenosti silskohospodarskykh pidpryiemstv Kharkivskoi oblasti materialnotekhnichnymy resursamy [Assessment of the current state of provision of material and technical resources of agricultural enterprises of the Kharkiv region]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu im. V.V. Dokuchaieva. Seriia: Ekonomichni nauky – Bulletin of Kharkiv National Agrarian University named after V.V. Dokuchaeva Series: Economic Sciences*, *6*, 139–145. [in Ukrainian]
13. Hrytsyshyn, M., Perepelytsia, N. (2017). *Rynok traktoriv v Ukraini. Propozytsiia. Suchasna tekhnika dlia suchasnoho ahrariia* [*The market of tractors in Ukraine. Offer: Special issue. Modern equipment for the modern farmer*], 4–6. [in Ukrainian]
14. Kovtun, Ju.I. et al. (2020). Texnolohična bločno-variantna systema mašynovykorystannja v zemlerobstvi Ukrajiny [Technological block-variant system of machine use in agriculture of Ukraine]. Part. 1. Kh.: TOV Planeta-Prynt [in Ukrainian]
15. Luparenko, H.V. (2015). Stanovlennja traktorobuduvannja v Ukrajini [Development of tractor manufacturing in Ukraine: monograph]. Derž. Polites. muzej pry NTUU «KPI» ; Centr pamjatkoznavstva NAN Ukrajiny i UTOPIK. Nižyn : PP Lysenko M.M. [in Ukrainian].
16. Nakaz Ministerstva ahrarnoji polityky ta prodovol′stva Ukrajiny #29 vid 22.01.2013 [Order of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine No. 29 dated January 22, 2013]. *zakon.rada.gov.ua.* Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0243-13#Text [in Ukrainian]
17. Gorb, Oleg et al. (2023). Strengthening Competitiveness of the National Economy by Inhancing Energy Efficiency and Diversifying Energy Supply Sources in Rural Areas. *Journal of Environmental Management and Tourism*, [S.l.], *Vol. 11, 5*, 1114-1123. doi: https://doi.org/10.14505//jemt.v11.5(45).09 [in English].
18. Burlaka, O. A., Jaxin, S. V., Padalka, V. V., & Burlaka, A. O. (2021). 100 ton za hodynu, a ščo dali? Porivnjujemo ta analizujemo xarakterystyky flahmans′kyx modelej vysokoproduktyvnyx zernozbyral′nyx kombajniv [100 tons per hour, what next? We compare and analyze the characteristics of flagship models of high-performance grain harvesters.]. *Scientific Progress & Innovations*, *(3),* 274–288. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34 [in Ukrainian]

Oleksandra Bilovod, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viacheslav Padalka,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Burlaka,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Update of the Tractor Park of the Poltava Region, Analysis and Perspectives

The purpose of the study is to improve the organizational and technical mechanisms for updating the tractor fleet of enterprises and individuals of the Poltava region, taking into account modern trends and transformations of the region's economy, caused by the state of war.

The initial data for the study are the characteristics of purchased and registered tractors from 2018 to 2023, which are reflected in the single register for keeping automated records of tractors of the agricultural machinery registration department of the head office of the State Production and Consumer Service in Poltava region. We include the following characteristics among the investigated factors:

1. The year of registration of tractors in the unified register of automated accounting of tractors of the agricultural machinery registration department of the Main Department of the State Production and Consumer Service in Poltava region.

2. Entities registering tractor equipment are classified by groups: private individuals; farms, enterprises engaged in other economic activities.

In the Poltava region from 2018 to 2021, there is a clear tendency of the generalized trend towards a stable increase in the number of purchased equipment for all three selected research groups. The beginning of military events led to a sharp – more than twofold – reduction of purchased and registered tractors and tractor equipment.

The dynamics of the ratio of the use of foreign tractors and tractors of domestic production is no less a painful topic for Ukraine. In addition, the indicators of 2022 and 2023 have a negative trend towards a significant relative increase in the tractor market of the Poltava region of foreign-made tractors. The number of

foreign tractor models in 2022 and most of 2023 exceeded the registration of domestically produced tractors by almost three times.

To improve this situation, machine-building enterprises are recommended to master new tractor-building technologies, taking into account the experience of the world's leading manufacturers.
tractors, registration, analysis, dynamics, forecasting, update

Одержано (Received) 08.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 24.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.312; 631.316.22 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.196-208

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

Дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту

В роботі доводиться доцільність проведення глибокого безполицевого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами та підіймається питання доцільності вивчення впливу параметрів ґрунтообробного агрегату і комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту. Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту. Експериментально знайдені області раціональних значень, при яких якість кришення ґрунту є рівною 70…75% , що досягається при глибині розпушування чизельними лапами 32…42 см, відстані між чизельними лапами в одному ряду 80…100 см, відстані між рядами чизельних лап 40…55 см, швидкості обробітку ґрунту 8…9,5 км/год, глибині встановлення крил на стояку лапи 24…27 см та кількості додаткових робочих органів (зубчастих котків) 2 шт.
параметри глибокорозпушувача, комбінація робочих органів, ефективність обробітку ґрунту, чизельні лапи, додаткові робочі органи

Постановка проблеми. Під час вирощування продукції рослинництва однією із найбільш енергонасичених та низькопродуктивних операцій залишається основний обробіток ґрунту[1, 2, 3]. Варто зазначити, що частково питання підвищення продуктивності першого глибокого обробітку ґрунту та зниження витрат енергії вирішується за рахунок впровадження в технологічні процеси вирощування сільськогосподарських культур глибокого розпушування без обертання скиби. Такі операції проводяться глибокорозпушувачами різних конструкцій, плоскорізами, ярусними культиваторами тощо [2, 3, 4]. Окрім зниження енерговитрат та підвищення продуктивності праці, безполицеві робочі органи на етапі основного обробітку ґрунту дозволяють поліпшити водно-повітряний режим, зменшити чи взагалі усунути прояви різних видів ерозій ґрунту, започаткувати в господарстві систему ґрунтовідновлення.

© С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, В. Мельніченко, 2023

Слід відмітити, що сьогодні на полях України в якості агрегатів для безполицевого обробітку ґрунту найбільшого розповсюдження знайшли комбіновані глибокорозпушувачі [1…4]. Такі ґрунтообробні агрегати мають порівняно просту конструкцію, легко агрегатуються із існуючими енергетичними засобами як вітчизняного так і закордонного виробництва, але визначитися фермеру – який ґлибокорозпушувач із якими робочими органами та за яких умов доцільно використовувати,досить складно.Це обумовлено широким набором як основних так і додаткових робочих органів, різноманіття схем машин, засилля закордонних сільськогосподарських агрегатів, інколи із зайвими, досить дорогими конструктивними елементами, які використовуються для безполицевого обробітку ґрунту. Таким чином, питання вивчення впливу конструктивних параметрів та режимів роботи глибокорозпушувачів на ефективність їх роботи та підбір комбінації робочих органів, які можуть використовуватися в межах одного агрегату в залежності від польових умов, дозволить з практичної точки зору знайти раціональну конструкцію таких ґрунтообробних агрегатів.

Аналіз основних досліджень і публікацій.Дослідженням впливу параметрів ґрунтообробних робочих органів та різноманітністю їх комбінацій в межах одного агрегату на ефективність обробітку ґрунту займалися І.А. Шевченко [5], І.М. Панов, В.І. Ветохін, В.Ф. Пащенко, В.О. Дубровін[8], В.П. Ковбаса [9], А.С. Кушнарьов, Я.С. Гуков [6, 7], В.І. Корабельський [10], Д.Г. Войтюк [11], В.М. Булгаков [12] та ін. Незважаючи на значну кількість проведених досліджень агрегатів для безполицевого обробітку ґрунту, основні роботи присвячені руйнуванню монолітів ґрунту, взаємодії окремих елементів та робочих органів із частками ґрунту, побудові,у більшості випадків, статистичних моделей роботи окремих елементів конструкції ґрунтообробних агрегатів, пошуку раціональних форм поверхонь робочих органів та розрахунку тягового опору і пошуку шляхів зниження загального тягового опору різних за конструкціями глибокорозпушувачів.

У своїх роботах А.С. Кушнарьов запропонував нове бачення впливу ґрунтообробних робочих органів на структурні елементи ґрунту,на основі яких, керуючись принципами та методами механіки суцільних середовищ та використовуючи реологічні властивості ґрунту, отримані загальні моделі руйнування суцільного середовища в зоні дії робочого органу. Такий підхід дозволяє частково вирішити питання пошуку необхідної форми поверхні ґрунтообробних робочих органів, а подальші роботи дозволили обґрунтувати, що найбільш раціональною формою поверхні ґрунтообробного робочого органу повинна бути ввігнута логарифмічна крива, яка до того ж володіє і покращеною розпушувальною здатністю.Основну роботу під час безполицевого обробітку ґрунту виконує долото, яке сколює і спрямовує зрушені моноліти на подальший рух, розпушування і перемішування [1, 2, 5 15, 16]. При цьомуформа, кривизна долота та характерні робочі кути визначають ступінь подрібнення, інтенсивність утворення тріщин і загальні енерговитрати на процес. Знову можна стверджувати, що обґрунтування параметрів та форми основних робочих органів глибокорозпушувачів на основі класичної механіки повністю не враховують кінцеві якісні показники обробітку ґрунту.

Разом з тим, існує ряд досліджень [2, 5, 6, 8, 10], в яких доводиться, що поряд із формою поверхні робочих органів, суттєво впливають і на якість процесу і на опір ґрунтообробного знаряддя форми стояків та їх розміщення на рамі агрегату. За існуючою класифікацією всі стояки можна розділити на прямі, похилі та С-подібні. Незалежно від форми стояка профіль борозни після роботи глибокорозпушувача буде містити трикутні гребені із кутом при вершині цих гребенів близьким до 90º. Для

забезпечення роботи глибокорозпушувача в якості знаряддя для суцільного обробітку, необхідно на рамі агрегату робочі органи розмістити таким чином, щоб зони розповсюдження бокових деформацій ґрунту в обидві сторони від долота перетиналися, незалежно від глибини роботи агрегату.Отримані залежності[1, 7], що дозволяють обґрунтувати взаємне розміщення чизельних лап у поперечно-вертикальній площині та аналітичні вирази для оцінки зон деформації попереду та по бокам чизельних лап. Такі дослідження підтверджують доцільність розміщення основних робочих органів на рамі агрегату в два чи три ряди, та дозволяють знайти раціональні розрахункові відстані між суміжними лапами. Зроблений висновок [9, 13, 14] про доцільність використання прямих стояків, оскільки їх вартість виготовлення та компонування в агрегати є простішим у порівнянні із стояками складних форм, а аналогічне зниження опору та поліпшення кришення, як у похилих стояків типу Пароплау, можна досягти на прямих стояках шляхом використання різних додаткових елементів [14, 15, 16].Стверджувати про обґрунтування конструктивних параметрів глибокорозпушувачів з точки зору розміщення чизельних лап на рамі агрегатів на основі отриманих залежностей[6, 7] складно, так як у наведених виразах відсутні показники якості проведення обробітку ґрунту, а в основі розрахунків покладені міркування забезпечення заданої глибини суцільного обробітку та параметрів гребенів на дні борозни.

Ще одним важливим фактором, який впливає на ефективність обробітку ґрунту глибокорозпушувачами, є додаткові робочі органи. До таких робочих органів, крім різноманітних крил, закрилок, інших інтенсифікаторів, що встановлюються безпосередньо на стояку чизельної лапи, відносять і додаткові конструктивні елементи, що встановлюються в більшості випадків позаду ґрунтообробного агрегату [14, 15]. Такі додаткові робочі органи бувають парними та одноелементними, до того ж, в більшості випадків ці робочі органи ще й виконують функцію опорних [17]. Доведено, що в ускладнених умовах роботи, коли ґрунт є переущільненим та або ж занадто вологим чи пересушеним, ще й на поверхні поля міститься значна кількість пожнивних решток попередника, найкраще себе у якості додаткових робочих органів зарекомендували спарені зубчасті котки [15, 17]. Однак, наведені обґрунтування конструктивних параметрів та режимів їх роботи знову не враховують оцінку якості проведених робіт, а проведені експериментальні дослідження не дозволяють оцінити повну компоновку агрегату в системі основні-додаткові робочі органи.

Постановка завдання. Отже, метою даної роботи є дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту.

Виклад основного матеріалу.Для оцінки ефективності роботи комбінованих чизельних глибокорозпушувачів та впливу параметрів і режимів роботи основних та додаткових робочих органів на якість безполицевого обробітку ґрунту, керуючись методикою планування багатофакторного експерименту, проведені експериментальні дослідження. Для цього на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету було виготовлено дослідний зразок глибокорозпушувача (рис. 1)[13, 14], який фактично є повноцінним ґрунтообробним агрегатом із трьома чизельними лапами із прямим стояком, долотом, зубом та крилами. Конструкція дослідного глибокорозпушувача виготовлена таким чином, що на кронштейнах можна легко змінювати положення чизельних лап на рамі знаряддя в широкому діапазоні як між рядами так і за шириною захвату агрегату. Крім того, на стояку можна змінювати положення відносно дна борозни додаткових розпушувальних крил. Глибину обробітку чизельними лапами глибокорозпушувача

змінювали за рахунок зміни положення відносно рами спарених зубчастих котків, які в якості додаткових робочих органів забезпечують більш інтенсивне подрібнення крупних брил та перемішування рослинних решток, насіння та добрив на глибині 0…15 см. У випадку роботи без котків, експериментальний глибокорозпушувач працював із опорними колесами, якими і регулювали глибину обробітку ґрунту чизельними лапами. Під час проведення експерименту дослідний ґрунтообробний агрегат працював із трактором МТЗ-82 (тяговий клас 1,4). Експериментальні дослідження проводилися протягом 2014…2022 років на різних полях Кіровоградщини. В подальшій статистичній моделі наведені усереднені дані досліджень, отриманих в різні роки. Ґрунт, що оброблявся під час дослідів, за механічним складом відноситься до важких суглинкових ґрунтів, із діапазоном твердості 20…85 кг/см^2. Ефективність роботи чизельного глибокорозпушувача оцінювали коефіцієнтом, що враховує якість кришення ґрунту та має наступний фізичний зміст [13, 14]:

$$k = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%,$$

де k – коефіцієнт кришення ґрунту, %;

m_1 – сумарна вага у навісці агрегатів ґрунту, розмір яких є меншим за 50 мм, кг;

m_2 – загальна сумарна вага навіски ґрунту, кг.



Рисунок 1 – Загальний вигляд комбінованого чизельного глибокорозпушувача під час проведення експериментальних досліджень

Джерело: розроблено авторами із використанням [13, 14]

За відомою методикою обрали найбільш впливові фактори, які визначають роботу глибокорозпушувача. До цих факторів включили: глибину розпушування чизельними лапами $h(x_1)$, см; відстань між чизельними лапами в одному ряду, $b(x_2)$, см; відстань між рядами чизельних лап, $l(x_3)$, см; швидкість обробітку ґрунту, $V_a(x_4)$, км/год; глибину встановлення крил на стояку лапи $h_к(x_5)$, см;кількість додаткових робочих органів (спарених зубчастих котків) $z(x_6)$, шт. Рівні варіювання перелічених факторів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання під час експериментальних досліджень роботи чизельного глибокорозпушувача

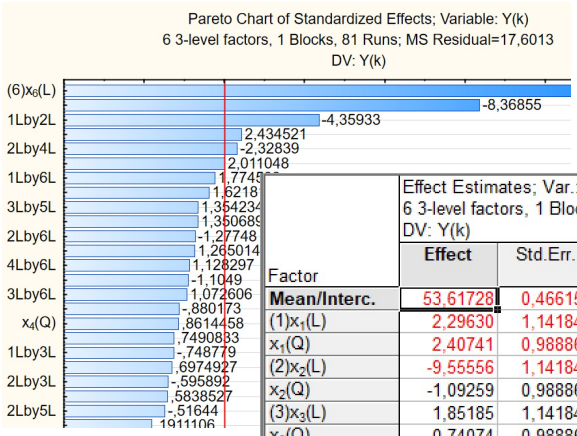
№	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Назва	Позначення	Верхній +	Нижній -	
1	Глибина розпушування чизельними лапами, h, см	x_1	45	20	12,5
2	Відстань між чизельними лапами в одному ряду, b, см	x_2	90	50	20
3	Відстань між рядами чизельних лап, l, см	x_3	80	20	30
4	Швидкість обробітку ґрунту, V_a, км/год	x_4	8,9	5,9	1,5
5	Глибина встановлення крил на стояку лапи, $h_к$, см	x_5	28	18	5
6	Кількість додаткових робочих органів (зубчастих котків), z, шт	x_6	2	0	1

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні дослідження проводили із використанням пакету прикладних програм STATISTICA 12, із врахуванням того, що фактор – кількість додаткових робочих органів (спарених зубчастих котків) $z(x_6)$, є блочним фактором. Дана прикладна програма дозволяє не лише провести планування експериментальних досліджень і провести обробку результатів, а і в автоматичному режимі перевірити отриману статистичну математичну модель на адекватність і відтворюваність. Значимість коефіцієнтів рівняння регресії на критерій оптимізації, який в даному випадку є коефіцієнт кришення ґрунту $Y(k)$, оцінювали стандартизованою Парето-картою (рис. 2). Так, Парето-карта дозволяє провести оцінку найбільш значимих факторів, а перетин на цій карті стовпцями, що відображають конкретні коефіцієнти рівняння регресії, показують 95% тест визначення значимості даного коефіцієнта.Табличний результат статистичного моделювання наведено на рис. 2.

За результатами проведених досліджень отримали статистичну математичну модель, яка відображає вплив досліджуваних факторів на критерій оптимізації у наступному вигляді:

$$Y_1 = 53,617 + 1,148x_1 - 4,778x_2 + 0,926x_3 + 0,722x_4 + 0,333x_5 + 6,5x_6 +$$
$$+1,204x_1^2 - 0,546x_2^2 + 0,37x_3^2 + 0,426x_4^2 - 0,436x_5^2 - 0,046x_6^2 -$$
$$-3,148x_1x_2 - 0,541x_1x_3 + 0,143x_1x_4 + 0,133x_1x_5 + 1,281x_1x_6 -$$
$$-0,417x_2x_3 - 1,681x_2x_4 - 0,361x_2x_5 - 0,925x_2x_6 - 0,022x_3x_4 +$$
$$+0,98x_3x_5 + 0,75x_3x_6 + 0,504x_4x_5 + 0,815x_4x_6 + 0,944x_5x_6$$



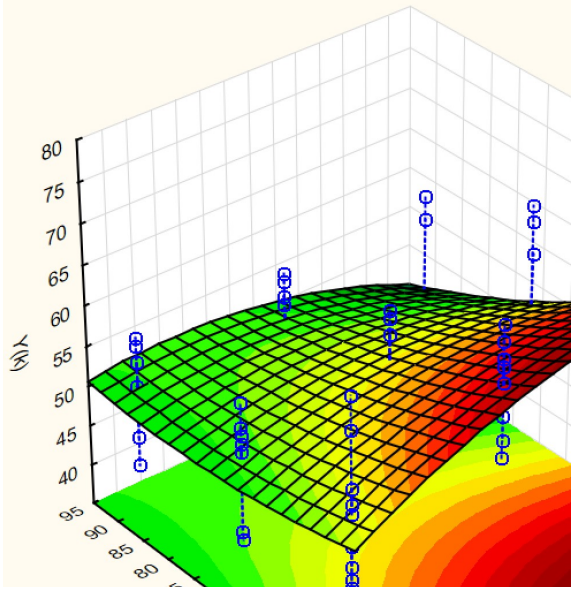
Effect Estimates; Var.:Y(k); R-sqr=,8262; Adj:,73767 (Spreadsheet12(халтура кінц 3 2023).sta)
6 3-level factors, 1 Blocks, 81 Runs; MS Residual=17,6013
DV: Y(k)

Factor	Effect	Std.Err.	t(53)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err Coeff.
Mean/Interc.	53,61728	0,466154	115,0204	0,000000	52,6823	54,55227	53,61728	0,4661
(1)x_1(L)	2,29630	1,141841	2,0110	0,049419	0,0061	4,58654	1,14815	0,5709
x_1(Q)	2,40741	0,988863	2,4345	0,018312	0,4240	4,39082	1,20370	0,4944
(2)x_2(L)	-9,55556	1,141841	-8,3686	0,000000	-11,8458	-7,26531	-4,77778	0,5709
x_2(Q)	-1,09259	0,988863	-1,1049	0,274195	-3,0760	0,89082	-0,54630	0,4944
(3)x_3(L)	1,85185	1,141841	1,6218	0,110778	-0,4384	4,14209	0,92593	0,5709
x_3(Q)	0,74074	0,988863	0,7491	0,457119	-1,2427	2,72415	0,37037	0,4944
(4)x_4(L)	1,44444	1,141841	1,2650	0,211400	-0,8458	3,73469	0,72222	0,5709
x_4(Q)	0,85185	0,988863	0,8614	0,392873	-1,1316	2,83526	0,42593	0,4944
(5)x_5(L)	0,66667	1,141841	0,5839	0,561796	-1,6236	2,95691	0,33333	0,5709
x_5(Q)	-0,87037	0,988863	-0,8802	0,382739	-2,8538	1,11304	-0,43519	0,4944
(6)x_6(L)	13,00000	1,141841	11,3851	0,000000	10,7098	15,29024	6,50000	0,5709
x_6(Q)	-0,09259	0,988863	-0,0936	0,925752	-2,0760	1,89082	-0,04630	0,4944
1L by 2L	-6,29630	1,444327	-4,3593	0,000060	-9,1932	-3,39934	-3,14815	0,7221
1L by 3L	-1,08148	1,444327	-0,7488	0,457301	-3,9784	1,81547	-0,54074	0,7221
1L by 4L	0,28571	1,495020	0,1911	0,849169	-2,7129	3,28435	0,14286	0,7475
1L by 5L	0,26667	1,444327	0,1846	0,854224	-2,6303	3,16362	0,13333	0,7221
1L by 6L	2,56296	1,444327	1,7745	0,081724	-0,3340	5,45992	1,28148	0,7221
2L by 3L	-0,83333	1,398463	-0,5959	0,553784	-3,6383	1,97163	-0,41667	0,6992
2L by 4L	-3,36296	1,444327	-2,3284	0,023738	-6,2599	-0,46601	-1,68148	0,7221
2L by 5L	-0,72222	1,398463	-0,5164	0,607695	-3,5272	2,08274	-0,36111	0,6992
2L by 6L	-1,84921	1,447547	-1,2775	0,207002	-4,7526	1,05421	-0,92460	0,7237

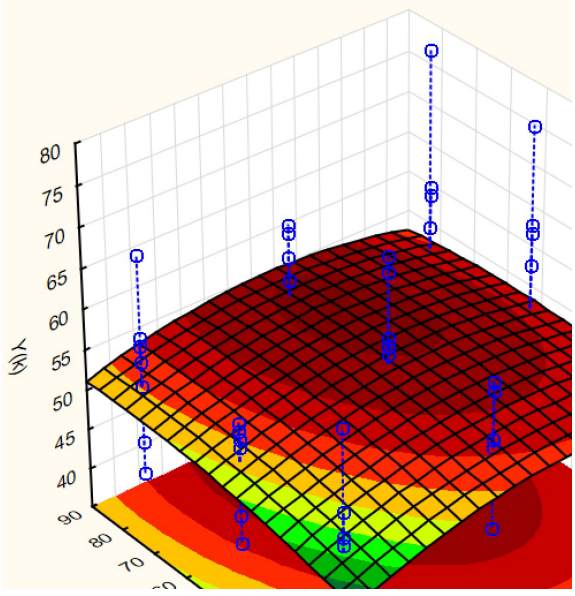
Рисунок 2 – Парето карта та табличний результат дослідження впливу факторів на ефективність роботи комбінованого чизельного глибокорозпушувача

Джерело: розроблено авторами

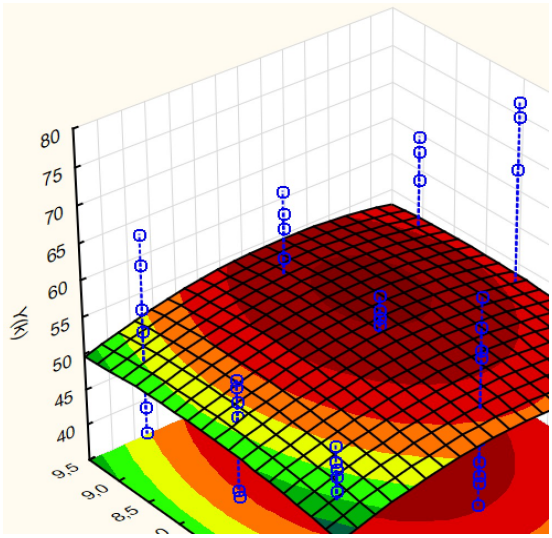
Графіки попарного впливу обраних факторів на якість роботи, виконаної комбінованим чизельним глибокорозпушувачем наведено на рис. 3.



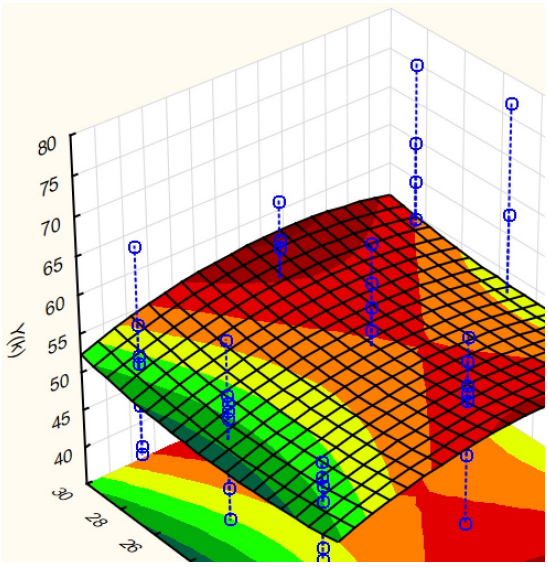
$Y = f(x_1 x_2)$



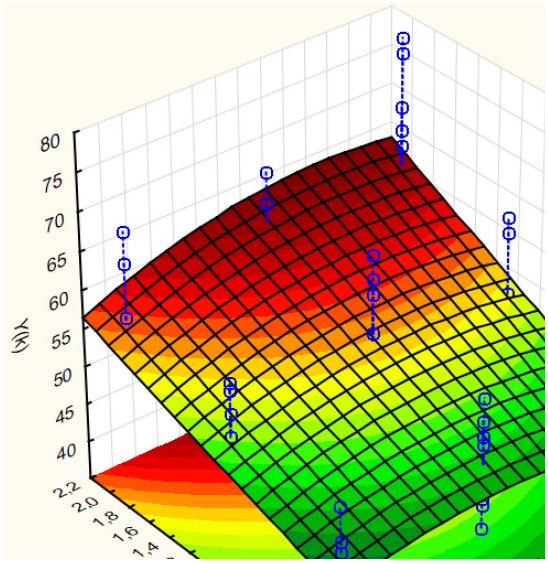
$Y = f(x_1 x_3)$



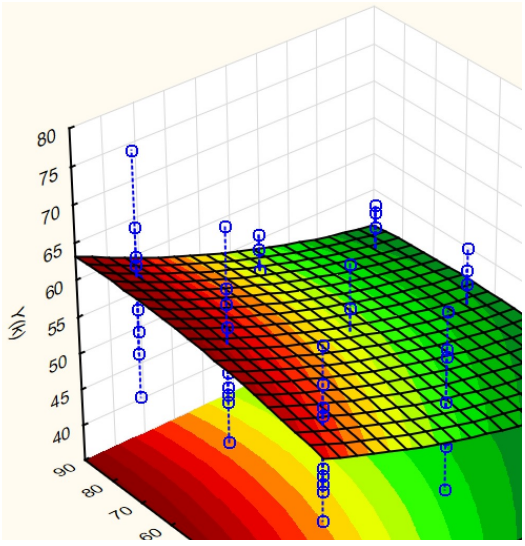
$Y = f(x_1 x_4)$



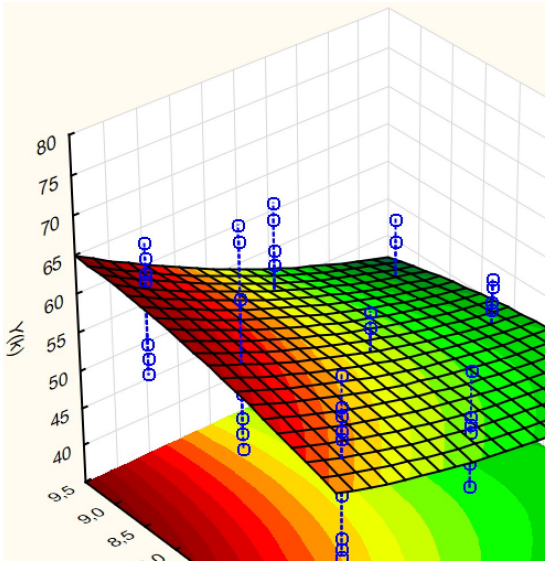
$Y = f(x_1 x_5)$



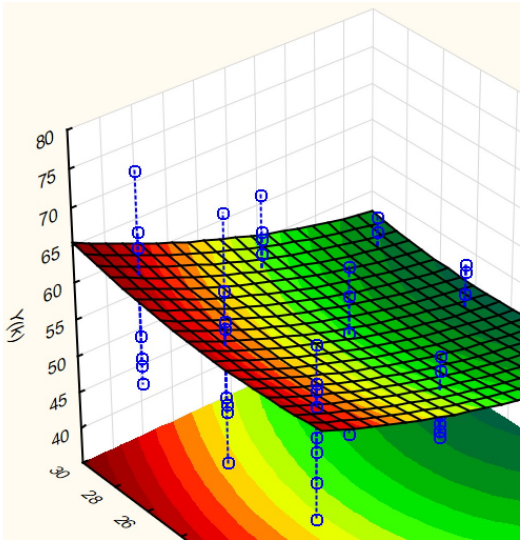
$Y = f(x_1 x_6)$



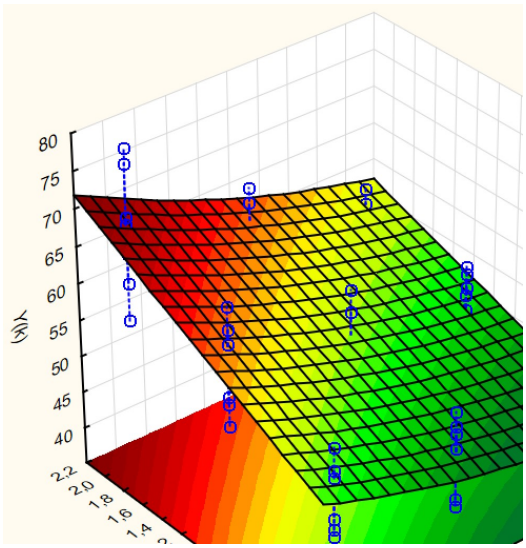
$Y = f(x_2 x_3)$



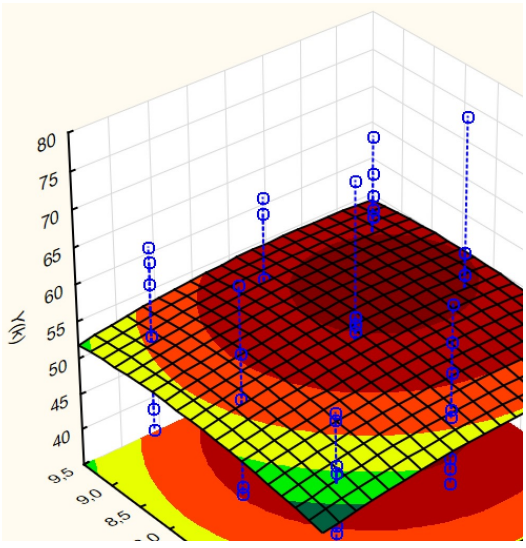
$Y = f(x_2 x_4)$



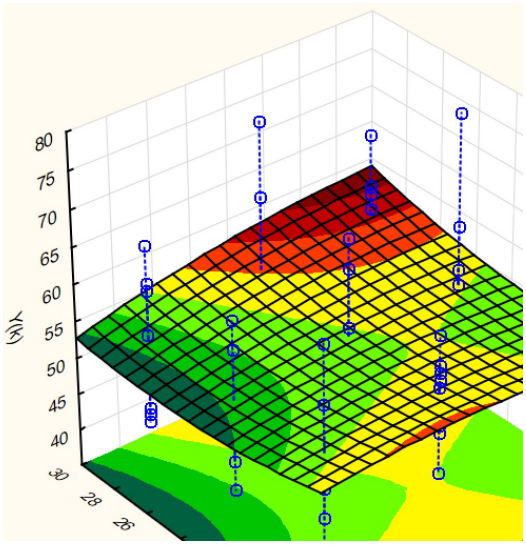
$Y = f(x_2 x_5)$



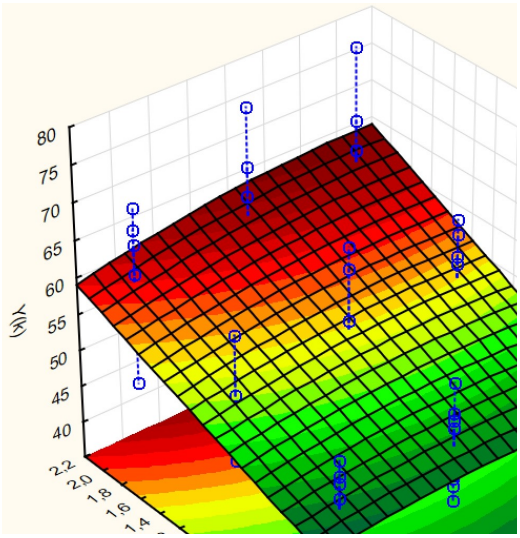
$Y = f(x_2 x_6)$



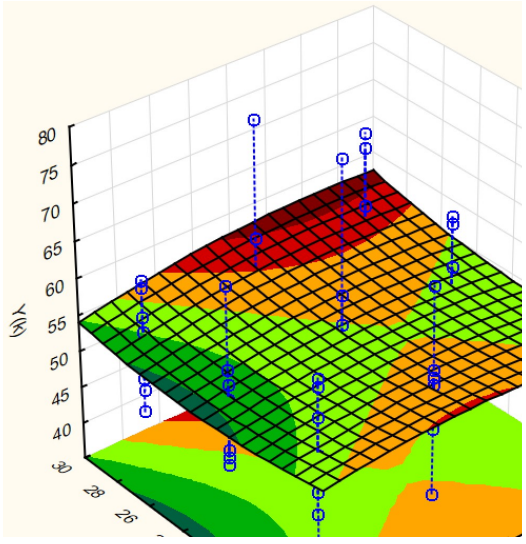
$Y = f(x_3 x_4)$



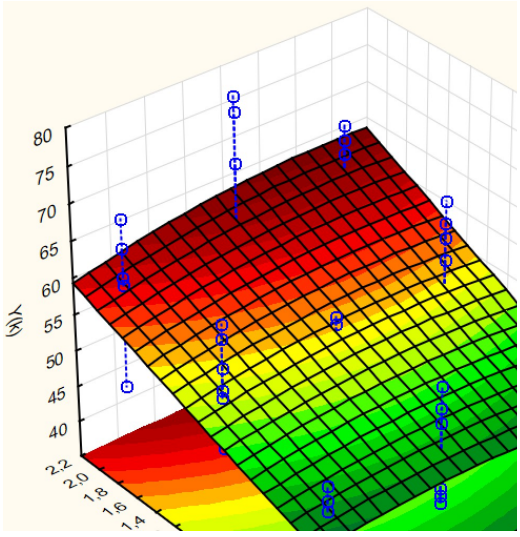
$Y = f(x_3 x_5)$



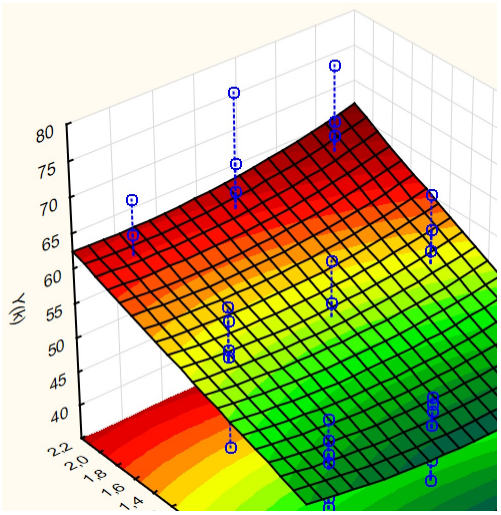
$Y = f(x_3 x_6)$



$Y = f(x_4 x_5)$



$Y = f(x_4 x_6)$



$Y = f(x_5 x_6)$

Рисунок 3 – Графіки попарного впливу факторів та лінії рівного виходу впливу обраних факторів на якість проведення основного безполицевого обробітку ґрунту комбінованим чизельним глибокорозпушувачем

Джерело: розроблено авторами

В результаті проведених досліджень та на основі рівняння регресії, Парето-карти та табличних результатів (рис. 2) видно, що найбільше впливають на процес кришення ґрунту глибокорозпушувачем в обраному інтервалі значень факторів лінійна та квадратичні взаємодії глибини розпушування чизельними лапами h та відстань між чизельними лапами в одному ряду b, лінійна взаємодія кількості додаткових робочих органів (зубчастих котків) z та попарна взаємодія глибини розпушування h і відстані між чизельними лапами в одному ряду b та відстані між чизельними лапами в одному ряду b і швидкості обробітку ґрунту V_a. Глибина розпушування чизельними лапами є фактором, що визначає загальну доцільність проведення безполицевого обробітку ґрунту і є відомим, що збільшення глибини таких операцій дозволяє зруйнувати ущільнену підорну підошву та поліпшити інфільтраційні властивості. Виходячи із графічного відображення результатів експериментальних досліджень (рис. 3), найбільш доцільно проводити глибоке розпушування на глибину $h = 32...42$ см. Відстань між чизельними лапами в одному ряду b є фактором, що пов'язаний із глибиною обробітку та в своїй сукупності дані чинники забезпечують можливість проведення суцільного обробітку із перекриттям зон деформації робочими органами. До того ж, сумісно ці два фактори визначають форму і висоту гребенівна дні борозни, або ж можуть призвести допосмугового обробітку. Враховуючи необхідність проведення суцільного основного обробітку та з врахуванням заданих глибин розпушування, раціональні значення відстані між чизельними лапами в одному ряду мають знаходитися в діапазоні значень $b = 80...100$ см. Відстань між рядами чизельних лап l є фактором, що має прямий зв'язок із конструкцією ґрунтообробного агрегату, але в будь-якому випадку, при надмірно близькому розміщенні рядів робочих органів створюються умови для забивання чизельних лап рослинними рештками та ґрунтом. Незважаючи на те, що в проведеному дослідженні вплив даного фактору на критерій оптимізації є малозначимим, раціональні значення відстані між рядами робочих органів дорівнюють $l = 40...55$ см. Зменшення цієї відстані менше наведеного діапазону значень призводить до погіршення якості обробітку, а перевищення зазначених значень не має прямого впливу на якість процесу, проте впливає на збільшення загальної маси агрегату та

призводить до збільшення кінематичної довжини агрегату. Швидкість обробітку ґрунту V_a задає необхідну продуктивність агрегату, а проведені дослідження доводять, що найкращу якість обробітку можна досягти якщо швидкість комбінованого чизельного глибокорозпушувача дорівнює $V_a = 8...9,5$ км/год. Глибина встановлення крил на стояку лапи $h_к$ має найвагоміший вплив на профіль дна борозни та можливість руйнування гребенів, які утворюються між зонами деформацій чизельних лап. При глибині обробки чизельними лапами до 42 см варто, щоб крила на стояку встановлювалися на $h_к = 24...27$ см. Зрештою, підтверджується, що робота спареного зубчастого котка підвищує якість кришення ґрунту, а кількість котків, що працюють у комбінованому агрегаті мають становити $z = 2$ шт.

Таким чином, використовуючи методику планування багатофакторного експерименту, отримано залежності та їх графічне відображення, які дозволяють обґрунтувати раціональні параметри і режими роботи комбінованого чизельного глибокорозпушувача.

Висновки:

1. В роботі доводиться доцільність проведення глибокого безполицевого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами та підіймається питання доцільності вивчення впливу параметрів ґрунтообробного агрегату і комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту.

2.Існуючі дослідження вирішують питання руйнування монолітів ґрунту, взаємодії окремих елементів та робочих органів із частками ґрунту, побудови статистичних моделей роботи окремих елементів конструкції ґрунтообробних агрегатів, пошуку раціональних форм поверхонь робочих органів та шляхів зниження загального тягового опору різних за конструкціями глибокорозпушувачів, однак оцінка якості роботи подібних ґрунтообробних агрегатів в залежності від їх конструкції, комбінації робочих органів та параметрів вивчені недостатньо.

3. Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту. Експериментально знайдені області раціональних значень, при яких якість кришення ґрунту є рівною $k = 70...75\%$, що досягається при наступних умовах:

- глибина розпушування чизельними лапами, $h = 32...42$ см;
- відстань між чизельними лапами в одному ряду, $b = 80...100$ см;
- відстань між рядами чизельних лап, $l = 40...55$ см;
- швидкість обробітку ґрунту, $V_a = 8...9,5$ км/год;
- глибина встановлення крил на стояку лапи, $h_к = 24...27$ см;
- кількість додаткових робочих органів (зубчастих котків), $z = 2$ шт.

Список літератури

1. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / Сало В.М. та ін. Х.: Мачулін, 2016. 244 с.
2. Машини для обробітку ґрунту та сівби : посібн. ; за ред. Кравчука В.І., Мельника Ю.Ф. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. 288 с.
3. Vasylkovska K.V., Leshchenko S.M., Vasylkovskyi O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basictillage and sowing asinitialsta geofharvest for ecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering* . 2016 . Vol.50 No.3, P.13-20 ref.18.
4. Azizi A., Gilandeh Y. A., Mesri-Gundoshmian T., Saleh-Bigdeli A. A., Moghaddam H. A. Classification of soil aggregates: A novel approach based on deep learning. Soil and Tillage Research. 2020. 199, 104586. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104586.

5. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища . К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016 . 320 с.
6. Гуков Я.С. Обробітокгрунту. Технологія і техніка . К.: Нора-Принт, 1999 . 275 с.
7. Гуков Я.С. Обґрунтування деяких параметрів розпушувачів ґрунту . *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2000. Вип.83. С.84-88.
8. Дубровін В.О., Теслюк В.В. Дослідження ефективності технології і техніки мінімалізації весняного передпосівного обробітку ґрунту під сівбу цукрових буряків . *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2013. Вип. 185(1). С. 11-17.
9. Ковбаса В.П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізаціївзаємодії робочих органів з ґрунтом: автореф. дис. на здобуття наук.ступеня д-ра техн. наук. : 05.05.11. Київ, 2006. 35 с.
10. Корабельський В.І., Спірін А.В., Ковальова І.М. Розробка серповидної стойки асиметричного чизеля . *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.* 2011. Вип. 6. С. 72-75. URL: http://repository.vsau.org/getfile.php/3502.pdf (дата звернення: 17.11.2023).
11. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини: підр. К.: Каравела, 2018. 552 с.
12. Дослідження вібраційних процесів при основному обробітку ґрунту / В.М. Булгаков та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. 5, Т. 1. С. 3-13.
13. Leschenko S., Salo V., Petrenko D. Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб*. 2014. Вип. 44 . С. 237-243.
14. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Експериментальна оцінка якості роботи комбінованого чизеля з додатковими горизонтальними та вертикальними деформаторами . *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Механізація сільського господарства* . 2015. Вип. 156. С. 25-34.
15. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Оцінка енергоємності глибокого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць ЦНТУ* . 2018. Вип. 31. С. 10–20.
16. Лещенко С. М. , Сало В.М. Шляхи підвищення ефективності роботи комбінованих чизельних ґрунтообробних знарядь з додатковими деформаторами . *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. 2016. Вип. №4 (103) . С. 31-37. URL: https://journal.imesg.gov.ua/info/attach.php?id=66 (дата звернення: 22.11.2023).
17. Лещенко С.М., Сало В.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Визначення параметрів та ефективність роботи додаткових робочих органів глибокорозпушувачів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб*. 2022. Вип. 52. С. 108-117. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.108-117.

Referencis

1. Salo, V.M., Leshhenko, S.M., Luzan, P.G., Machok, Yu.V. & Bogatir`ov, D.V. (2016). *Mashyny dlia obrobitku gruntu ta vnesennia dobryv. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei [Tillage and fertilizer machines. A textbook for students of agricultural specialties]*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
2. Kravchuk, V.I. & Melnyk, Yu.F. (2009). *Posibnyk. Mashyny dlia obrobitku gruntu ta sivby [Manual. Machines for soil cultivation and seeding]*. Doslidnytske: UkrNDIPVTim. L. Pohoriloho. [in Ukrainian].
3. Vasylkovska, K.V, Leshchenko, S.M., Vasylkovskyi, O.M. & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering, Vol.50, No.3*, 13-20 [in English].
4. Azizi, A., Gilandeh, Y. A., Mesri-Gundoshmian, T., Saleh-Bigdeli, A. A., & Moghaddam, H. A. (2020). Classification of soil aggregates: A novel approach based on deep learning. *Soil and Tillage Research*, *199*, 104586. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104586 [in English].
5. Shevchenko, I.A. (2016*). Keruvannya agrofizichnim stanom gruntovogo seredovisha [Management of Agrophysical Condition of Soil Environment]*. Kyiv: Vidavnichij dim «Vinichenko» [in Ukrainian].
6. Hukov, Ya.S. (1999). *Obrobitok hruntu. Tekhnolohiia i tekhnika [Tillage of the soil. Technology and equipment]*. Kyiv: Nora-Prynt [in Ukrainian].

7. Hukov, Ya.S. (2000). Obgruntuvannia deiakykh parametriv rozpushuvachiv gruntu [Justification of some parameters of soil looseners]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mekanisasion ken elektripikasion ti agrikultura*, *Issue 83,* 84-88 [in Ukrainian].
8. Dubrovin, V.O. & Tesliuk, V.V. (2013). Doslidzhennia efektyvnosti tekhnolohii i tekhniky minimalizatsii vesnianoho peredposivnoho obrobitku gruntu pid sivbu tsukrovykh buriakiv [Study of the efficiency of the technology and technique of minimizing the spring pre-sowing tillage for sowing sugar beets*]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia: Tekhnika ta enerhetyka APK – Sientipiko a Boletin ti Nailian nga Unibersidad ti Bioresources ken Panagmanehar ti Nakaparsuaan ti Ukraine. Serye: Teknolohia ken enerhia ti industria ti agrikultura, Vol. 185(1),* 10–20. [in Ukrainian].
9. Kovbasa, V.P. (2006). Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia optymizatsii vzaiemodii robochykh orhaniv z gruntom [Mechanical and technological substantiation of the optimization of the interaction of working bodies with the soil] . *Extended abstract of doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
10. Korabelskyi, V.I., Spirin, A.V. & Kovalova, I.M. (2011). Rozrobka serpovydnoi stoiky asymetrychnoho chyzelia [Development of a sickle-shaped rack of an asymmetric chisel]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Sientipiko a Boletin ti Nailian nga Unibersidad ti Bioresources ken Panagmanehar ti Nakaparsuaan ti Ukraine. Serye: Teknolohia ken enerhia ti industria ti agrikultura*, Vol. 6, 72-75. Retrieved from http://repository.vsau.org/getfile.php/3502.pdf [in Ukrainian].
11. Voitiuk, D.H. & Havryliuk, H.R. (2018). *Silskohospodarski mashyny [Agricultural machinery]*. Kyiv: Karavela [in Ukrainian].
12. Bulhakov, V.M., Sviren, M.O., Kisilov, R.V., Oryshchenko, S.B. & Lisovyi, I.O. (2015). Doslidzhennia vibratsiinykh protsesiv pry osnovnomu obrobitku gruntu [Study of vibrational processes during basic tillage]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Sientipiko a boletin ti Tavriyya State Agro-Teknolohiko nga Unibersidad, Isue 5, Vol. 1,* 3–13. [in Ukrainian].
13. Leschenko, S., Salo, V. & Petrenko, D. (2014). Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, *Issue 44*, 237-243 [in English].
14. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. & Petrenko, D.I. (2015). Eksperymentalna otsinka yakosti roboty kombinovanoho chyzelia z dodatkovymy horyzontalnymy ta vertykalnymy deformatoramy [Experimental assessment of the quality of work of a combined chisel with additional horizontal and vertical deformers]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka . Mekhanizatsiia silskoho hospodarstva – Boletin ti Petro Vasylenko Kharkiv Nailian a Teknikal nga Unibersidad ti Agrikultura. Mekanisasion ti agrikultura, Vol. 156,* 25-34. [in Ukrainian].
15. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. & Petrenko, D.I. (2018). Otsinka enerhoiemnosti hlybokoho obrobitku gruntu kombinovanymy chyzelnymy hlybokorozpushuvachamy [Assessment of energy intensity of deep cultivation of soil by combined chisel deep tillers]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia* : *zb. nauk. prats TNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation :Collected Works of KNTU*, *Vol. 31,* 10–20 [in Ukrainian].
16. Leshchenko, S.M. & Salo, V.M. (2016). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti roboty kombinovanykh chyzelnykh gruntoobrobnykh znariad z dodatkovymy deformatoramy [Ways to improve the efficiency of combined chisel tillage tools with additional deformers]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva: zahalnoderzhavnyi zb. – Mekanisasion ken elektripikasion ti agrikultura: nailian a koleksion, Issue 4(103)*, 31-37. Retrieved from https://journal.imesg.gov.ua/info/attach.php?id=66.
17. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Vasylkovskyi, O.M. & Petrenko, D.I. (2022). Vyznachennia parametriv ta efektyvnist roboty dodatkovykh robochykh orhaniv hlybokorozpushuvachiv [Determination of parameters and efficiency of additional operating parts of deep tillers]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, *Issue* 52, 108-117. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.108-117 [in Ukrainian].

Serhii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD of tech. sci., **Vasyl Salo,** Prof., DSc., **Dmytro Petrenko,** Assoc. Prof., PhD of tech. sci., **Olexiy Vasylkovskyi,** Prof., PhD in tech. sci., **Viktor Melnychenko,** post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research on of the Influence of Deep Tiller Parameters and Combination of Operating Parts on Soil Cultivation Efficiency

The paper proves the expediency of deep subsurface tillage with combined chisel deep tillers and raises the question of the expediency of studying the influence of tillage unit parameters and a combination of operating parts on the efficiency of tillage. Existing research addresses the issues of soil monolith destruction, interaction of certain elements and operating parts with soil particles, construction of statistical models of the operation of certain elements of tillage units, search for rational forms of surfaces of operating parts and the ways to reduce overall traction resistance of different deep tillers, but the assessment of the quality of operation of such tillage units depending on their design, combination of operating parts and parameters has not been sufficiently studied.

To study the parameters of a deep tiller, a prototype was made, which is actually a full-fledged tillage unit with three chisel tines with a straight riser, a chisel, a tooth and wings. The design of the experimental deep tiller is made in such a way that the position of the chisel tines on the unit frame can be changed on the brackets in a wide range, both between rows and in terms of the working width of the unit. In addition, the deep tiller can be operated with different variants of the toothed roller. After selecting the most significant factors and the interval of their values based on the methodology for planning a multivariate experiment, studies were conducted to obtain a statistical mathematical model and response surfaces for tillage efficiency. The obtained regression equation was tested for reproducibility and adequacy, and the graphical display of the research results allows obtaining the desired design parameters and operating modes of the tillage unit.

Experimentally found areas of rational values at which the quality of soil pulverization is equal to 70...75%, which is achieved at the depth of loosening with chisel tines 32...42 cm, the distance between the chisel tines in one row 80... 100 cm, distance between rows of chisel tines 40...55 cm, tillage speed 8...9.5 km/h, depth of wings on the tine riser 24...27 cm and number of additional operating parts (toothed rollers) 2 pcs.

parameters of a deep tiller, combination of operating parts, soil cultivation efficiency, chisel tines, additional operating parts

Одержано (Received) 18.09.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.2 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.208-217

В.І. Ребенко, доц., канд. техн. наук, **В.С. Хмельовський,** проф., д-р техн. наук, **В.М. Туринський,** проф., д-р с.-г. наук
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
e-mail: rebenko@nubip.edu.ua, khmelovskyi@nubip.edu.ua, v.turinskiy@ukr.net

Обґрунтування форми споруди для промислового утримання кіз

Здійснено аналіз конструкцій різних тваринницьких будівель в яких утримують тварин. Визначено, що однією з раціональних форм тваринницького приміщення для утримання кіз, у сімейних фермах, є коло. Встановлено, що найбільш привабливими є конструкції зернових силосів з плоским дном. При цьому, машини, під час виконання технологічних процесів, будуть характеризуватись мінімальним переміщенням та енергозатратами. Приведено методи розрахунку приміщення та обґрунтовано обладнання для виконання технологічних процесів.

козівництво, технологія, утримання, годівля, круглі приміщення

Постановка проблеми. Молочна продукція, отримана від кіз, характеризується найбільшою популярністю серед споживачів, які мають проблеми із засвоєнням лактози,як на світовому, так і вітчизняному ринку. Козине молоко переважає коров’яче

© В.І. Ребенко, В.С. Хмельовський, В.М. Туринський, 2023

за наявністю жиру, білка, кальцію, вітамінів, має високі смакові якості і підвищені бактерицидні властивості. Також відомо [1, 2, 3], що у молоці великої рогатої худоби жирові кульки у шість разів більші за кульки жиру в козиному молоці. Козине молоко має невеликий розмір структурних компонентів жиру і білка. Цей факт сприяє кращому засвоєнню організмом людини козиного молока, що робить його незамінним у дитячому та дієтичному харчуванні [2, 4]. Така особливість впливає на швидкість засвоєння людиною даного продукту. Вживання козиного молока запобігає багатьом хворобам, наприклад, екземі, астмі та різним формам алергії, а також допомагає у лікуванні жовчних шляхів, печінки, легень, простудних захворювань й підвищеної кислотності шлунку. М'ясо кіз корисне для споживання, так як має в своєму складі малий вміст холестерину. За напрямом виробництва продукції козівництва, кози бувають: вовнові, пухові, молочні, м'ясні, та комбіновані, проте у різних варіантах поєднання вони спроможні давати молоко.

Досвід різних господарств, а особливо, країн із розвинутим козівництвом, показав, що виробництво продукції молочного напрямку є привабливим для сімейного бізнесу. Відомо [5, 6], що у світі кількість молочних козиних ферм щорічно зростає. Утримання череди до 30 кіз сьогодні розцінюється, як хобі, за умови побічного доходу, а 500–4000 кіз, як основний вид господарської діяльності. Утримання 90–150 голів молочних кіз практикується здебільшого для переробки молока й самостійного збуту продукції на ринку сиру. Напрям м‘ясного козівництва, при поголів’ї менше 10 голів, вважається, як захоплення, чи додатковий прибуток, також кіз використовують для збереження ландшафтного дизайну.

Огляд сучасних практик в козівництві та аналіз проблем та можливостей для розвитку цієї галузі в різних країнах світу [7, 8, 9, 10, 11] показує, що такі аспекти, як умови утримання кіз, годівля, розведення та управління стадом мають недоліки та пропонують рішення для покращення цих методів. Вони описують результати досліджень приміщень для кіз, техніки годівлі та системи управління стадом і показують, що більшість фермерів використовують традиційні методи годівлі та управління стадом, що призводить до низької продуктивності та здоров'я кіз. Автори роблять висновок про необхідність вдосконалення умов утримання кіз та впровадження сучасних та новітніх технологій.

Аналізуючи існуючі технології управління стадом та годівлі кіз автори [12, 13, 14] звертають увагу на важливість механізації технологічних процесів та використання сучасних систем управління для підвищення продуктивності кіз і ефективності виробництва, а також зменшення витрат на утримання поголів’я.

При аналізі [15, 16] використання різного обладнання для доїння кіз та його впливу на якість молока, можна отримати рекомендації використовувати сучасне обладнання для доїння, щоб забезпечити високу якість молока та зменшити ризик пошкодження вимені кіз.

Приміщення для кіз має відповідати цілій низці вимог [17]. Воно повинно бути світлим, просторим, мати достатню вентиляцію, але протяги в ньому повинні бути відсутніми. Споруда також повинна відповідати певному набору умов [18]. Зокрема, в зимовий час температурний режим в ній повинен підтримуватися на рівні 8–10 °С, а в літні місяці споруда не повинна сильно прогріватися. Її висота не повинна бути більше 2,5 м.

В переважній більшості літературних джерел міститься інформація про приміщення для утримання кіз, яка вказує на важливість правильної організації

приміщень для забезпечення комфортних умов утримання та підвищення продуктивності.

Такі приміщення повинні мати певні параметри, які забезпечують комфорт та безпеку тварин. Автори [19, 20] рекомендують використовувати приміщення з площею не менше 1,5 квадратних метрів на кожну козу. Також вони звертають увагу на важливість правильної організації вентиляції та освітлення, що допоможе забезпечити комфортні умови утримання кіз і підвищити їх продуктивність. Зокрема, рекомендується, щоб приміщення для утримання кіз мали нахил не менше 3% для забезпечення швидкого відведення води, та підлога в них була покрита нековзним матеріалом. Крім того, рекомендується використовувати приміщення з достатньою кількістю простору для кіз та місцями для харчування, поодинокого утримання кіз та надання відповідних умов для проходження технологічних процесів.

Приміщення для кіз, для середніх та великих промислових підприємств, мають переважно видовжену прямокутну форму, а для невеликих фермерських господарств існує безліч рекомендацій щодо форм та особливостей будівництва сараїв для тварин. Проте, існуючі проекти невеликих приміщень для утримання кіз, які б були сухими, чистими, теплими, без протягів, добре освітлювались та забезпечували мінімальні затрати, пов’язані із виконанням технологічних операцій, шляхом зменшення робіт із навантаження, транспортування та розвантаження, практично відсутні.

Кіз можна утримувати у будь-якому приміщенні, але воно повинно мати систему вентиляції, яка забезпечить мікроклімат без протягів. Потрібно встановлювати вікна на висоті 1,5–1,75 м від підлоги, це пов’язано з таким розрахунком, щоб кози не розбивали скла вікон. Низько встановлені вікна, як правило, відгороджують металевою сіткою.

В зимовий період температуру в приміщенні, де утримують кіз, підтримують на рівні 8–10ºС тепла, а при наявності малих козенят – 10–20 ºС. При підвищеній вологості середовища у кіз знижується жирність молока.

Розвиток та успішне функціонування виробництва продукції козівництва залежить від поголів’я тварин та відповідного забезпечення автоматизованими засобами виконання виробничих процесів, пов’язаних із життєвими потребами кіз. Для України оптимальним навантаження на гектар земельних угідь є 10 – 15 дійних кіз. Отже, для сімейної ферми, з поголів’ям 1000 голів, потрібно лише 100–150 га угідь [1, 2, 4]. У промисловому козівництві існує ціла низка проблем, пов’язаних із селекцією, технологією годівлі й утриманням кіз. Технологічні аспекти, які виникають в процесі ведення господарської діяльності у молочному козівництві, вимагають відповідності фізіологічних (конституційних) параметрів тварин до розмірів застосовуваного обладнання [1, 4, 13, 18].

На козиних фермах застосовують різні системи утримання [21]. Стійлову систему утримання практикують у районах, де є висока розораність земель та обмежена забезпеченість тваринницьких господарств пасовищами. Тварин, за такої системи, утримують у приміщеннях, а корми для них вирощують у польових сівозмінах. На пасовища, для активного моціону, виганяють лише козематок. В літній період для годівлі дорослої тварини потрібно на добу 5–8 кг зелених кормів, а в зимовий – 1–2,5 кг грубих, як правило, це сіно. Козам, особливо високоудійним, крім грубих кормів, продовж доби дають суміш подрібнених концентрованих кормів (0,3–1 кг на голову) і подрібнені соковиті: гарбузи, буряки, моркву, ріпу, капусту тощо (в межах 2–4 кг на добу), сиру, а також варену картоплю (1–2 кг на добу) [2].

Роздавати корми козам потрібно не менш, як двічі і не більш, як чотири рази на добу. Краще проводити годівлю тварин тричі на добу з регулярною повторюваністю.

Перший раз роздавання кормів можна здійснювати о 6–7-й, другий – о 12–13-й і третій – о 18–19-й годині. Таким чином можна організувати графік роботи підприємства, виходячи із зазначеного часу. Згодовувати кормові компоненти краще у складі кормових сумішок. Для приготування кормових компонентів доцільно використовувати подрібнювачі, переважно, ножового типу та змішувачі порційної дії [2, 3].

Кози – характеризуються, як тварини високого ступеня охайності, тож при засміченій напувалці або годівниці, вони відмовляться від споживання води та корму. Тому, після кожного роздавання кормових компонентів всі залишки корму слід вичищати із годівниці, а напувалку промивати [5, 6].

При обмеженому доступі до води напування кіз необхідно здійснювати два-три рази на день, при цьому, споживання води, при кожному напуванні, повинно становити на одну голову 2,5–4 л. Краща температура води для напування кіз 6–10 ºС. При достатньому забезпеченні господарства водою для напування, доцільно використовувати поплавкові або вакуумні напувалки.

Видалення гною у більшості приміщень забезпечує скребковий конвеєр типу КСГ-7.

Молочна продуктивність кози значною мірою залежить від правильного та вмілого догляду за вим’ям тварини та її доїння. Фізіологічно коза щодоби може дати 2–3 літри молока. Доїння кіз краще виконувати двотактними доїльними апаратами попарної дії у доїльній залі типу «паралель». Основною операцією процесу первинного обробітку молока є охолодження. Цей процес дуже сильно впливає на вартість молока, а відповідно, рентабельність підприємства.

Розвиток та успішне функціонування козиних ферм залежить від багатьох чинників, але найбільш вагомими є приміщення, в яких утримують кіз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До складу козиної ферми входять основні та допоміжні виробничі будівлі та споруди, які розміщені по зонах, на єдиному генеральному плані, згідно з нормами технологічного проектування і зв’язані зручними комунікаціями, на підставі високоефективної системи обслуговування і машинної технології виробництва тваринницької продукції високої якості. До основних виробничих приміщень відносяться споруди і будівлі для утримання тварин: козятники, родильні відділення та ін. Допоміжні та підсобні об'єкти забезпечують нормальне функціонування виробництва: споруди для ветеринарного обслуговування і лікування тварин, водопостачання, кормоцехи, силосні, сінажні траншеї і башти, кормові майданчики для зберігання кормів, кормосховища, гноєсховища, майстерні, службові та побутові приміщення тощо.

Сільськогосподарські споруди та приміщення повинні якомога більше задовольняти функціонально-технологічним, технічним, зооветеринарним, санітарним, економічним та архітектурним вимогам. Ці вимоги забезпечуються складом і розміром приміщень, параметрами внутрішнього середовища, технологічним та санітарно-технічним обладнанням.

Територія ферми зонується, споруди повинні мати архітектурну виразність, міцність, стійкість, довговічність, стабільність експлуатаційних якостей, відповідати умовам протипожежної безпеки.

При проектуванні козиних ферм передбачають будівництво з розподілом на блоки будинків і споруд основного, виробничого, підсобного і допоміжного призначення, з метою підвищення компактності забудови, скорочення протяжності всіх комунікацій та площі огорожі будинків і споруду, у відповідності з вимогами ДБН Б.2.4-3-95.

Козятники повинні бути одноповерховими та прямокутними. Допускається проектувати будівлі інших форм, але при умові можливості застосування всередині приміщеньмеханізмів для роздавання кормів та видалення гною. Будівлі повинні бути економічними, а за габаритами відповідати вимогам технологічного процесу.

Технологічний зв'язок окремих приміщень та їх розміщення повинні забезпечувати раціональну організацію робіт та необхідні технологічні процеси, які повинні здійснюватися в залежності від системи утримання. З кожної секції повинен забезпечуватися зручний вихід тварин на вигульно-кормові майданчики.

Проектування та дослідження форми будівель проводили за допомогою розрахункового та графоаналітичного методів.

Постановка завдання. Таким чином, метою досліджень є обґрунтування форми приміщення у вигляді кола та переліку обладнання для виконання технологічних процесів, при виробництві продукції козівництва.

Основним завданням було виявити конструкції, які адаптовані у сільськогосподарському виробництві та запропонувати їх використання для утримування тварин у фермах сімейного типу.

Виклад основного матеріалу. Аналіз конструкцій різних тваринницьких будівель, в яких утримують тварин, приводить до висновку, що однією з раціональних форм тваринницького приміщення для утримання кіз є коло. Така форма приміщення обумовлена типом тварин та їх фізіологічними невибагливими потребами. В приміщеннях, які мають вигляд кола, є можливість легкого забезпечення функціонування машин та обладнання усіх виробничих процесів, при цьому значно зменшуються витрати матеріальних та людських ресурсів. Дослідження споруд, які у поперечному перерізі мають форму кола, дали можливість виявити, що найбільш привабливими є конструкції зернових силосів з плоским дном. Діаметри зернових силосів, які застосовують у сільськогосподарському виробництві, варіюються від 4,58 м до 32 м і досягають місткості до 24687м³. Конструкція даху силосів має схил близько 30°, що дозволяє збільшити місткість приміщення. Аналіз зоотехнічних вимог, що ставлять до тваринницьких приміщень показав, що конструкція зерносховища за багатьма показниками може відповідати тваринницьким приміщенням. Конструктивно такі приміщення можуть забезпечити найбільш оптимальну висоту стін у 2,5–3 м. Стіни такої будівлі можуть мати утеплення, а міцнісні та протипожежні характеристики відповідають найвищому класу. При цьому, машини під час виконання технологічних процесів, будуть характеризуватись мінімальним переміщенням та енергозатратами. Так, для роздавання кормових компонентів можна використати кран-балку, змінні її робочі органи можуть з легкістю забезпечити внесення підстилки та видалення гною із стійл. Конструкція даху приміщення, що має ухил у 30° дасть можливість забезпечити на належному рівні мікроклімат для тварин. В приміщеннях круглої форми легко утримати оптимальні показники: температуру 8–20°, відносну вологість повітря 65–75 %, швидкість переміщення повітря 0,2–0,5 м/сек., вміст аміаку менше 5 $см^3/м^3$, освітленість 20–75 %. Напування тварин здійснюється груповими поплавковими або вакуумними напувалками. Приміщення всередині розділено на сектори (рис. 1), в яких безприв’язно утримують тварин, а з південної сторони приміщення встановлюють вхідні ворота.

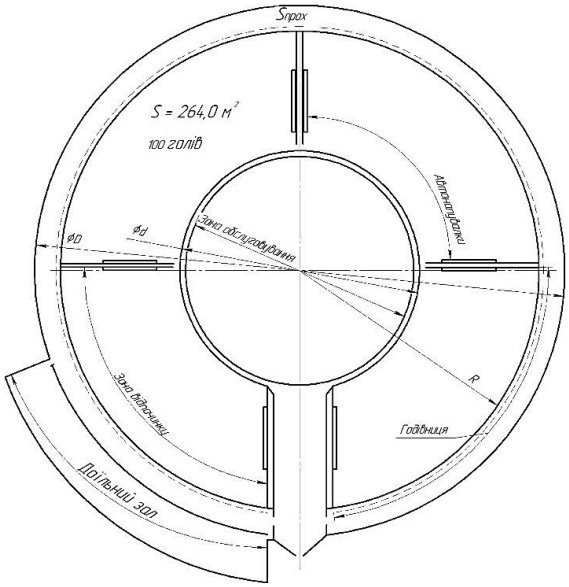


Рисунок 1 – Схема будівлі для утримання кіз

Джерело: розроблено автором

Площу $S_{пр}$ секторів приміщення для утримання тварин визначаємо із виразу (1)з урахуванням даних таблиці 1.

Таблиця 1 – Вимоги до утримання тварин

Фізіологічний стан тварин	**Площа для лежання/ руху (м^2)**	**Ширина місць для годівлі (мінім.), м**
Дорослі кози	1,5–2,0	0,40
Коза з козеням	1,8–2,5	0,40
Молода коза	0,9–1,2	0,30
Козеня/ ягня	0,6–0,8	0,25
козел	2,0 –2,5	0,50
Об'єм повітря у стайні в м^3		
на дорослу козу	6–7	
на молоду козу	3–4	

$$S_{ПР} = \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4} - S_{ПРОХ}, \quad (1)$$

де D – діаметр приміщення, м;

d – діаметр зони обслуговування м, (0,3–0,35 D);

$S_{прох}$– площа технологічних проходів.

При утриманні кіз за умови використання глибокої підстилки (приблизно 0,5–1 кг/гол, щодоби) можна створити зони для відпочинку (рис. 2) та їх годівлі у кожному секторі.



Рисунок 2 – Обладнання для відпочинку кіз у будівлі
Джерело: *https://agrarausbildung-ukraine.net/wp-content/uploads/2020/07/Сучасні-технології-догляду-та-форми-утримання-кіз.pdf*

У центрі приміщення можна розміщати добову потребу кормових компонентів для наступних роздавань. Таке рішення дає можливість мінімізувати витрати праці на годівлю тварин, оскільки зберігається мінімальна відстань між місцем тимчасового зберігання кормових компонентів та годівницею.

Фронт годівлі $l_{фс}$ кожного сектора визначимо за формулою

$$l_{ФГ} = \frac{\pi R f}{180}, \tag{2}$$

де $l_{фс}$ – фронт годівлі кожного сектора, м;
R – радіус, за яким розміщено годівниці, м;
f – кут сектора, градуси.

Кількість місць для годівлі у кожному секторі $n_{мг}$ становить

$$n_{МГ} = \frac{\pi R f}{180 \cdot l_{СМ}} = \frac{l_{ФС}}{l_{СМ}}, \tag{3}$$

де $n_{мг}$ – кількість місць для годівлі у одному секторі, м;
$l_{см}$ – ширина місця годівлі на одну голову, м.

Кратність зміни тварин $k_{зт}$ біля годівниці в одному секторі рівна

$$k_{ЗТ} = \frac{n_{МГ}}{n_{Т}}, \tag{4}$$

де $k_{зт}$ – кратність зміни тварин біля годівниці в одному секторі;
$n_т$ – кількість тварин в одному секторі, голів.

Прибирання гною із приміщення забезпечує скребковий транспортер типу КСГ-7, а для його транспортування у сховище використовуються мобільні засоби механізації. Процес доїння кіз може реалізовуватись в молочному залі, який входить до конструкції приміщення, що забезпечує більш високу якість молока. В доїльному залі доцільно використовувати паралельно-прохідну доїльну установку. Освітлення у денний період забезпечують вікна, які розміщують на висоті не менше 1,4 м від підлоги, а у вечірній –

максимально реалізується штучне освітлення. Крім цього, забезпечення мікроклімату може бути виконане як за допомогою примусової. так і природньої вентиляції.
Отже, будівлі круглої форми можуть ефективно використовуватись для утримання кіз у сімейних фермах.

Висновки:

1. Утримання стада кіз для молочного або м'ясного напрямів, в межах 500–4000 голів, вважається основним видом господарської діяльності. Утримання 90–150 голів кіз молочного напряму, практикується, здебільшого, для переробки молока у господарстві й самостійного збуту продукції на ринку сиру.

2. Аналіз споруд, які мають у поперечному перерізі вигляд кола, дав можливість зробити висновки, що для утримання кіз найбільш адаптованими у сільськогосподарському виробництві є конструкції зернових силосів з плоским дном, та запропонувати їх використання у фермах сімейного типу.

3. Будівлі, що мають у поперечному перерізі вигляд кола, які використовуватимуться для утримання кіз, дозволяють мінімізувати експлуатаційні затрати, пов'язані із виконанням технологічних операцій, шляхом зменшення робіт, які забезпечують транспортування та роздавання кормів.

Список літератури

1. Васильєва О.О., Бондаренко О.М. Аспекти розвитку козівництва як сучасного напряму екологічного виробництва у тваринницькій галузі. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. Сер. Сільськогосподарська екологія.* 2017. № 3. С. 60–63.
2. Кози: догляд, годівля, утримання: веб-сайт. URL: http://agrokraina.com.ua/animals/272-kozi-doglyad-godvlya-utrimannya. html (дата звернення: 12.10.2017).
3. Ой чи їла, чи ти пила, моя кізонько? URL: http://agrokraina.com.ua/animals/67-oj-chi-yila-chi-ti-pila-moya-kizonko.html (дата звернення: 05.10.2023)
4. Сербіна В. Козівництво – перспективна галузь тваринництва України. *Тваринництво України*. 2012. № 8. С. 20–23.
5. Грищенко Н.П., Марченко І.О. Розвиток галузі козівництва України в умовах євроінтеграції. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва.* 2016. Вип. 236. С. 23-29.
6. Сербіна В.О. Історія та сучаний стан козівництва в Україні. *Науковий вісник "Асканія-Нова"*. 2012. Вип. 5. С. 196–200.
7. Sanon, H. O., Sow, M. Y., Tapsoba, S., & Ledin, I. Housing, management and breeding practices of goats in the rural areas of Burkina Faso. *Tropical Animal Health and Production*. 2013. Vol. 45, No 1. P. 111–118.
8. Mubvumba, P., Muvhali, L.M., & Mapiye, C. Goat production systems, status and prospects for research and development in the smallholder sector of Zimbabwe. *Springer Plus.* 2016. Vol. 5, No 1. P. 1–12.
9. Bedaso, M., Legesse, G., & Asfaw, Y. Management practices and challenges in goat production systems in Ethiopia. Ethiopian Veterinary Journal, 2018. Vol. 22, No 1. P. 51–68.
10. Okubanjo, A. O., & Oluwafemi, R. A. Goat production: a review of current practices, constraints, and opportunities. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*. 2019. Vol. 120. No 2. P. 153–168.
11. Hamid, H., Jabbar, M. A., Abbas, F., & Ahmed, S. Socioeconomic status of goat farmers and management practices in Punjab, Pakistan. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 2020. Vol. 30, No 4. P. 1054–1062.
12. Azad, A. K., & Zaman, M. A. Innovations in goat production and management in the context of sustainable livelihoods: a review. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 2021. Vol. 122, No 1. P. 1–22.
13. Aquilani C., Confessore A., Bozzi R., Sirtori F., Pugliese C. Review: Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal*. 2022. Vol. 16. No 1. art. no. 100429, DOI: 10.1016/j.animal.2021.100429
14. Chiu, Y.C., Tsai, W., & Wu, G. Developing an Automated Feeding System for Distributing Concentrated Goat Feed. *Applied Engineering in Agriculture*. 2020. Vol. 36. P. 125–140.

15. Alejandro, M. Automation devices in sheep and goat machine milking. *Small Ruminant Research*. 2016. Vol.142. P. 48–50.
16. Borso F, Kic P, Kante J. Analysis of Management, Labor and Economics of Milking Systems in Intensive Goat Farms. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, No 4. P. 507–513. https://doi.org/10.3390/agriculture12040513
17. ДБН В.2.2-1-95 Будівлі і споруди для тваринництва. [Чинний від 1995-02-01]. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування України, 1995. 34 с.
18. Польовий Л.В., Яремчук О.С. Захаренко М.О. Проектування та будівництво підприємств із виробництва і переробки продукції тваринництва : практикум. Вінниця : Видавництво ВДАУ, 2009. 320 с.
19. Barker, Z.E., Vázquez-Diosdado, J.A., Bocardo-Mendoza, I.H., Martínez-García, C.G., Orozco-Hernández, J.R. Comparison of production and reproductive performance in high and low yielding dairy cows housed in free stall barns in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*. 2018. Vol. 50, No 2. P. 327–332.
20. Wang, X., Li, S., Wu, L., Feng, Y., Johnston, L.J.. Effects of long-term exposure to fine particulate matter on health and production of dairy goats. *Environmental Pollution.* 2020. Vol. 2. P. 265–272.
21. Захаренко М.О., Поляковський В.М. Системи утримання тварин. К. : Центр учбової літератури, 2021. 424 с.

Referencis

1. Vasylieva, O.O. & Bondarenko, O.M. (2017). Aspekty rozvytku kozivnytstva yak suchasnoho napryamu ekolohichnoho vyrobnytstva u tvarynnytskiy haluzi. [Aspects of the development of goat breeding as a modern direction of ecological production in the livestock industry]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho derzhavnoho ahrarno-ekonomichnoho universytetu. Ser. Silskohospodarska ekolohiya – Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University. Agricultural ecology, 3*, 60–63 [in Ukrainian].
2. Kozy: dohlyad, hodivlya, utrymannya: veb-sayt. [Goats: care, feeding, maintenance: Website]. *agrokraina.com.ua.* Retrieved from http://agrokraina.com.ua/animals/272-kozi-doglyad-godvlya-utrimannya. html [in Ukrainian].
3. Oy chy yila, chy ty pyla, moya kizon′ko? [Oh, did you eat or did you drink, my dear?]. *agrokraina.com.ua* . Retrieved from http://agrokraina.com.ua/animals/67-oj-chi-yila-chi-ti-pila-moya-kizonko.html [in Ukrainian].
4. Serbina, V. (2012). Kozivnytstvo – perspektyvna haluz′ tvarynnytstva Ukrayiny. [Goat breeding is a promising branch of livestock breeding in Ukraine]. *Tvarynnytstvo Ukrayiny – Animal husbandry of Ukraine, 8*, 20–23 [in Ukrainian].
5. Hryshchenko, N.P. & Marchenko, I.O. (2016). Rozvytok haluzi kozivnytstva Ukrayiny v umovakh yevrointehratsiyi. [Development of the goat breeding industry of Ukraine in the conditions of European integration]. *Naukovyy visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny – . Seriya : Tekhnolohiya vyrobnytstva i pererobky produktsiyi tvarynnytstva – Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Production and processing technology of animal husbandry products,Issue 236*, 23–29 [in Ukrainian].
6. Serbina, V.O. (2012). Istoriya ta suchasnyy stan kozivnytstva v Ukrayini [The history and current state of goat breeding in Ukraine] . *Naukovyy visnyk "Askaniya-Nova" – Scientific Bulletin "Askania-Nova", 5,* 196–200 [in Ukrainian].
7. Sanon, H. O., Sow, M. Y., Tapsoba, S., & Ledin, I. (2013). Housing, management and breeding practices of goats in the rural areas of Burkina Faso. *Tropical Animal Health and Production, Vol. 45, No 1,* 111–118 [in English].
8. Mubvumba, P., Muvhali, L. M., & Mapiye, C. (2016). Goat production systems, status and prospects for research and development in the smallholder sector of Zimbabwe. *Springer Plus, Vol. 5, No* 1, 1–12 [in English].
9. Bedaso, M., Legesse, G., & Asfaw, Y. (2018). Management practices and challenges in goat production systems in Ethiopia. *Ethiopian Veterinary Journal, Vol. 22, No 1,* P. 51–68 [in English].
10. Okubanjo, A. O., & Oluwafemi, R. A. (2019) . Goat production: a review of current practices, constraints, and opportunities. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, Vol. 120. No 2,* P. 153–168 [in English].
11. Hamid, H., Jabbar, M. A., Abbas, F., & Ahmed, S. (2020). Socioeconomic status of goat farmers and management practices in Punjab, Pakistan. *The Journal of Animal and Plant Sciences, Vol. 30, No 4.* P.1054–1062 [in English].

12. Azad, A. K., & Zaman, M. A. (2021). Innovations in goat production and management in the context of sustainable livelihoods: a review. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics, Vol. 122, No 1.* P. 1–22 [in English].
13. Aquilani C., Confessore A., Bozzi R., Sirtori F., Pugliese C. (2022). Review: Precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. *Animal, Vol. 16. No 1,* art. no. 100429, DOI: 10.1016/j.animal.2021.100429 [in English].
14. Chiu, Y.C., Tsai, W., & Wu, G. (2020). Developing an Automated Feeding System for Distributing Concentrated Goat Feed. *Applied Engineering in Agriculture, Vol. 36,* P. 125–140.
15. Alejandro, M. (2016). Automation devices in sheep and goat machine milking. *Small Ruminant Research, Vol.142,* P. 48–50 [in English].
16. Borso, F., Kic, P. & Kante, J. (2022). Analysis of Management, Labor and Economics of Milking Systems in Intensive Goat Farms. *Agriculture, Vol. 12, No 4,* P. 507–513. https://doi.org/10.3390/agriculture12040513 [in English].
17. Budivli i sporudy dlya tvarynnytstva. [Buildings and structures for animal husbandry]. (1995*). DBN V.2.2-1-95* . Derzhkommistobuduvannya Ukrayiny – Development of Ukraine, 34 [in Ukrainian].
18. Polevyi, L.V., Yaremchuk, O.S. & Zakharenko, M.O. (2009). Proektuvannya ta budivnytstvo pidpryyemstv iz vyrobnytstva i pererobky produktsiyi tvarynnytstva : Praktykum. . [Design and construction of enterprises for the production and processing of livestock products: Workshop] Vinnytsya. Vydavnytstvo [in Ukrainian].
19. Barker, Z.E., Vázquez-Diosdado, J.A., Bocardo-Mendoza, I.H., Martínez-García, C.G. & Orozco-Hernández, J.R. (2018). Comparison of production and reproductive performance in high and low yielding dairy cows housed in free stall barns in Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, *Vol. 50, No 2,* P. 327–332 [in English].
20. Wang, X., Li, S., Wu, L., Feng, Y. & Johnston, L.J. (2020). Effects of long-term exposure to fine particulate matter on health and production of dairy goats. *Environmental Pollution, Vol. 2,* P. 265–272.
21. Zakharenko, M.O., & Polyakovs′kyy, V.M. (2021). *Systemy utrymannya tvaryn* [*Animal housing systems*]. Kyiv: Tsentr uchbovoyi literatury [in Ukrainian].

Victor Rebenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,**Vasyl Khmelovskyi,** Prof., DSc., **Vasyl Turinskyi,** Prof., DSc.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Substantiation of the Building Form for Industrial Goat Keeping

Goat breeding in Ukraine is developing in the following directions – meat, dairy, down, wool and combined in various combinations. The development and successful functioning of the production of goat products depends on the amount of provision of means of mechanization of production processes related to this production. An analysis of the constructions of various livestock buildings in which animals are kept was carried out. It has been determined that one of the rational forms of livestock premises for keeping goats in family farms is a circle. It has been established that the most attractive designs are grain silos with a flat bottom.

In rooms that have the shape of a circle, it is possible to easily ensure the functioning of all production processes, while the costs of material resources are significantly reduced. Structurally, such premises can provide the most optimal wall height of 2.5–3.5 m. The walls of such a structure, depending on the natural and climatic zone, can have insulation, and the strength characteristics correspond to the highest class.

The calculation of the area of the sectors of the room for keeping animals is consistent with the feeding front in each sector, the number of places for feeding in each sector and the frequency of changes of animals at the feeder are taken into account. Buildings based on a circular cross-section make it possible to minimize costs associated with technological operations by reducing transport, loading and unloading operations.

The methods of calculating the room and the equipment for performing technological processes are substantiated.

goat breeding, technology, keeping, feeding, round premises

Одержано (Received) 05.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.331 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.218-227

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук, **В.М. Кропівний,** проф., канд. техн. наук,
Р.В. Москальченко, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: viktor.deikyn@gmail.com

Аналіз способів сівби, перспективи вдосконалення

У статті приведено аналіз способів сівби сільськогосподарських культур та специфіку їх застосування, визначеноперевагти та недоліки вказаних способів, розглянуто способи заробкинасіння культур у грунт, акцентовано увагу на підґрунтово-розкидному способі посіву, суміщеному з поверхневим обробітком ґрунту, розглянуто різніконструкції комбінованих робочих органів для його здійснення. Вказано на особливість конструкції окремих елементів робочих органів, розглянуто способи транспортування та розподілення насіння залежно від конструкції лапового сошника, приведено аналіз конструкцій розподільників різних авторів та особливість їх застосування. Визначено напрямок майбутніх досліджень.

способи сівби, суцільнасівба, комбінований, підґрунтово-розкидний, напрямник, розподільник, розподіл

Постановка проблеми. Одним із найважливіших технологічних заходів в аграрному виробництві є сівба сільськогосподарських культур. Тому важливо обрати спосіб сівби, якийзабезпечуєоптимальні умови для проростання та розвитку насіння культурних рослин. Способи сівби залежать від біологічних особливостей культур (різні культури неоднаково вимогливі до родючості грунту, кількості тепла, освітлення, вологості тощо).Однією з основних вимог до способів сівби є створення оптимальної густоти посівів, що забезпечує найінтенсивніше наростання асиміляційної листкової поверхні – основного фактору врожайності. Досягнення таких умов залежить від вибору оптимального способу сівби та застосування робочого органу, який забезпечить такі умови. Саме комбіновані лапові сошники здатні,на наш погляд, розташувати насіння на дні борознисуцільним безрядковим способом,коликожна окрема насінина матиме власну площу живлення і матиме всі умови для росту і розвитку,при такому способі сівби спостерігається значна економія ресурсів за рахунок зменшення кількості технологічних операцій та ряду екологічних аспектів, що є особливо важливим.

Тому, застосування суцільної сівби та дослідження, направлені на розробку та вдосконалення комбінованих робочих органів для її здійснення,є актуальними та перспективними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Значний внесок для вирішеннятеоретичних досліджень та вдосконалення робочих органів посівних машин для сівби зернових культур зробили: Л.В. Погорілий, П.В. Сисолін, А.І. Бойко, С.І. Шмат, В.О. Бєлодєдовта ін. Проведено ряд досліджень, розроблено конструкціїкомбінованих робочих органів посівних машин та розподільних пристроївдля транспортування та розподіленнянасіннєвого матеріалу по ширині захвату лапового сошника,визначені основні недоліки та запропоновані шляхи до їх спрощення і покращення якості роботи при сівбі насіння зернових культур. Однак, підвищення ефективності використання всієї ширини захвату сошників може більш успішно вирішуватися за наявності математичного обґрунтування конструкційних параметрів елементів робочого органу [1,2, 5].

© В.А. Дейкун, В.М. Кропівний, Р.В. Москальченко, 2023

Постановка завдання. Метою статті є проведенняаналізу способів сівби, виконаннялітературного та патентногооглядуконструкцій комбінованих робочих органів для безполицевого обробітку ґрунту з одночасноюпідґрунтово-розкидноюсівбою зернових культур чивнутрішньогрунтовим внесенням мінеральних добрив, аналіз конструкцій розподільних пристроїв різних авторів та ефективності їх застосування.Встановлення перспективних напрямків удосконалення їх конструкції та ефективності функціонування.

Виклад основного матеріалу. На даний момент в агропромисловому виробництві застосовують такі способи сівби: звичайний рядковий; перехресний; вузькорядний; широкорядний; стрічковий; гніздовий; квадратно-гніздовий; пунктирний; борозенний; гребеневий, смуговий.

Існуючі способи сівби узагальнено можна поділити на рядковий і розкидний.

Рядковий спосіб сівби є основним, оскільки забезпечує рівномірнийпосів насіння в рядки з встановленим міжряддям і загортання його на однакову глибину у зволожений шар грунту.

При розкидному способі насіння у грунті розміщується без міжрядь. Виконують його вручну або комбінованими знаряддями. Цей спосіб сівби немає широкого застосування, зокрема через недостатню кількість посівних знарядь для його здійснення.

Найбільш гостро питання вибору способу сівбистоїть при вирощуванні зернових культур, площа живлення яких вимагає раціонального використання поживних елементів ґрунту та сонячної енергії. При цьому зменшується застосування хімічних препаратів для боротьби з бур'янами, оскільки останні біологічно пригноблюються культурними рослинами [2,7].

На наш погляд, найбільш раціональним є застосування підгрунтово-розкидного способу сівби, де в якості робочого органа використовується сошник для підґрунтово-розкидноїсівбизернових культур.

Дослідниками розроблено ряд робочих органів посівних машин та розподільників насіннєвого матеріалу по ширині захвату сошника, визначені основні недоліки їх конструкцій[2,3, 5,9]. Однак, проблемапідвищення ефективності використання ширини захвату сошників може вирішуватися за умови обґрунтування параметрів елементів конструкції робочого органа, проведення дослідження процесу руху насіння в підсошниковому просторі, визначення оптимальних параметрів сошника та відбивача насіння.

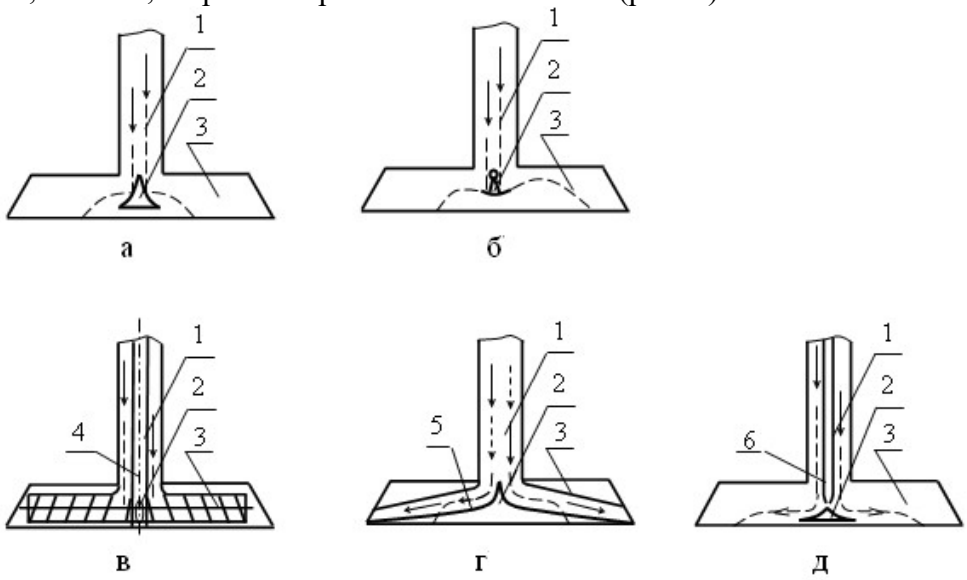
Для загортання насіння при сівбічи внутрішньогрунтовому внесенні гранульованих мінеральних добрив на відповідну глибину на практиці застосовуються плоскоріжучі лапи та сошники різних конструкцій. Кожний з цих робочих органів відрізняється конструкційнимипараметрами та має власні особливості використання.

Існує велика кількість плоскоріжучих лап різної конструкції, які при оснащені туковими пристроями використовуються для внесення мінеральних добрив в ґрунт широкими смугами чи суцільним фоном. При цьому, як правило, в конструкцію плоскоріжучих лап вносяться доповнення, які дозволяють більш ефективно використовуватипідлаповий простір, тим самим створивши кращі умови для розподілення насіння чи добрив. Розроблено також багато конструкцій спеціальних лапових сошників для смуговоїсівби та внесення мінеральних добрив, кожен з яких пристосований для певних умов роботи і має як переваги так і недоліки.

Конструкції типових сошників з розсіювачами описано в авторських свідоцтвах: сошники для суцільної сівби та внесення добрив, а саме: №35689, №31393, № 129713 (Україна); №4373455 (США); №2340677 (Франція); №2083731 (Великобританія); №2552810 та №3034410 (ФРН) [2].

На якість робочих комбінованих органів суттєво впливають наступні фактори: конструктивніпараметри самого сошника, а також конструкція розподільника.

Розподільники, які використовуються на такихробочих органах можна поділити на пасивні, активні, вібро-електричні та пневматичні (рис. 1).

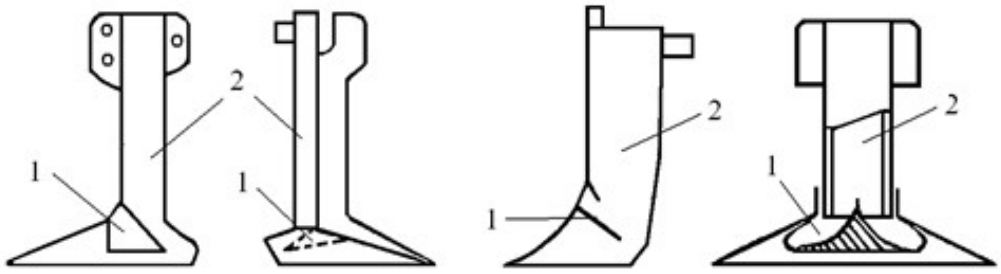


а – з пасивним розподільником; б – з вібраційним розподільником; в – з активним розподільником; г – з пневмотранспортуванням і розсівом; д – з пневморозсівом; 1 – матеріалопровід; 2 – розподільник; 3 – підлаповий простір;4 – механізм приводу; 5 – горизонтальний канал; 6 пневмопропровід;——→ – матеріал, що висівається, → – повітря

Рисунок 1 – Робочі органи для безрядкового розподілу матеріалу, що висівається, в ґрунті
Джерело: розроблено авторами

Робочі органи з пасивними розподільниками (рис. 2) представляють собою відбивачі плоскої, конусної та інших геометричних форм, які встановлені під певним кутом та на заданій відстані від точки сходу добрив з напрямника[2, 5]. Матеріал під дією гравітаційних сил рухається понапрямнику, звідки потрапляє на розподільник.Після відбиттявід його поверхню, частинкирозсіюються по дну борозни впідлаповому просторі.

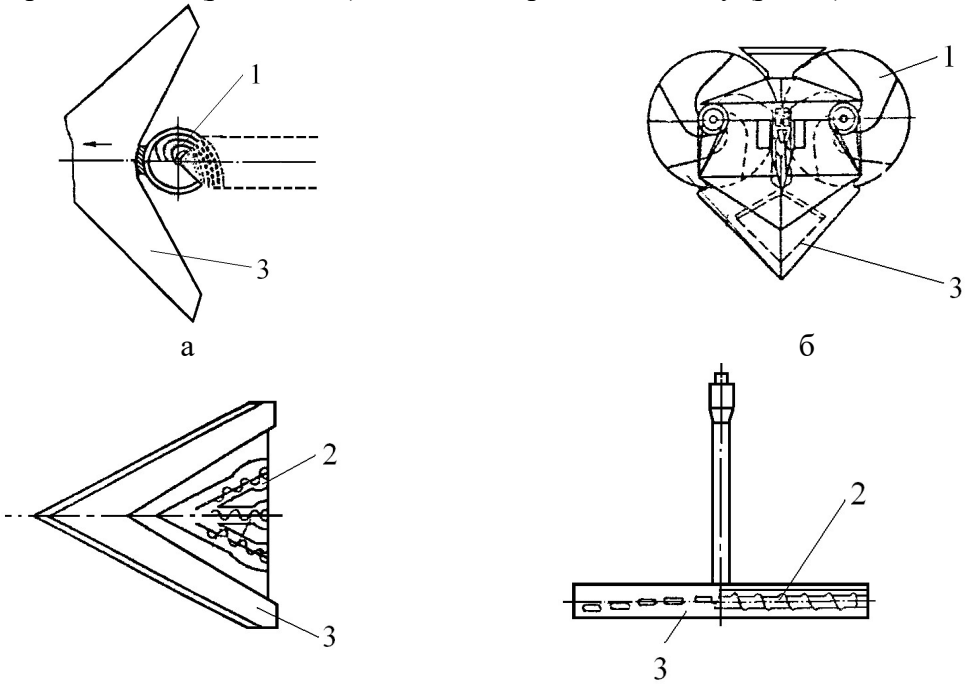
Недоліком цього методу є те, що вихідний матеріал повинен мати чітко виражену пружну поверхню, і транспортуватися по напрямнику, розміщеному лише вертикально чи під певним кутом до горизонту. Робочі органи з розподільниками такого типу мають незначну ширину розсіву вихідного матеріалу, яка не перевищує 15-20 см.



б – трикутний; в – плоский; д – параболічний. 1 – розподільник; 2 – насіннєпровід

Рисунок 2 – Робочі органи з розподільниками пасивного типу: а – конусний;
Джерело: розроблено авторами

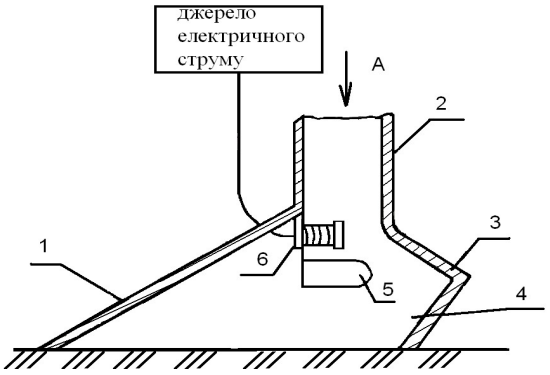
Робочі органи з активними розподільниками (рис. 3) забезпечують значно більшу ширину розсіву. Відомі розподільники активного типу [5]з лопатевими дисками, що обертаються, (рис. 3, а, б) (одно- або дводискові), зішнекамипоздовжнього та поперечного розміщення (рис. 3, в, д), а також вібраційного типу (рис. 4).



а – з одним активним диском; б – з двома активними дисками; в – з поздовжніми шнеками;
д – з поперечним розподільним шнеком
1 – диск; 2 – шнек; 3 – лапа
Рисунок 3 – Робочі органи з активними розподільниками
Джерело: розроблено авторами

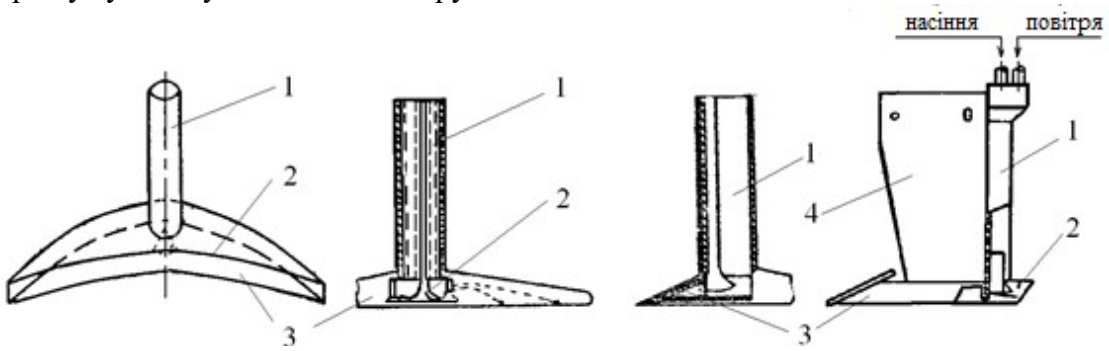
Недоліком даної групи розподільників є наявність в підлаповому просторі деталей, що рухаються, та складність їх – це знижує надійність їх функціонування.

Робочі органи з розподільником із електромагнітним вібратором (рис. 4) дещо підвищують якість розподілення вихідного матеріалу, але значно ускладнюють конструкцію, до того ж використання електромагнітних імпульсів призводить до додаткових ускладнень в процесі роботи[6].



1 – лапа;2 – насіннєпровід; 3 – щиток; 4 – підлаповий простір;
5 – розподільник;6 – електромагнітний вібратор
Рисунок 4 –Робочий органз розподільником електровібраційного типу
Джерело: розроблено авторами

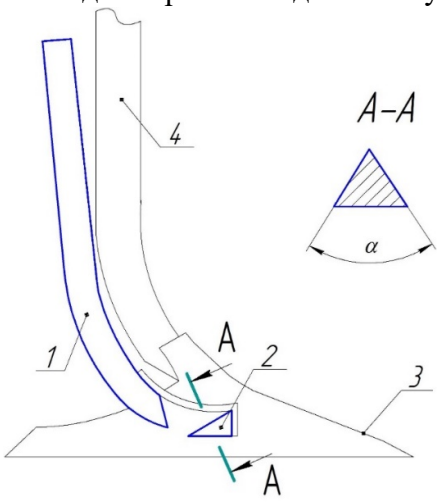
Робочі органи з пневматичними розподільними пристроями (рис. 5), в яких використовується енергія повітряного потоку, є досить перспективними, оскільки в даному випадку вихідний матеріал у потоці газів може транспортуватися по тукопроводах значної довжини (до 5 м), при цьому пневмопровід може бути розташований під різними кутами до горизонту. Змінюючи швидкість повітряного потоку, ми маємо змогу забезпечити ту швидкість руху часток на виході з тукопроводу, яка забезпечить необхідну ширину розсіювання, але такий спосіб транспортування матеріалу суттєво ускладнює конструкцію самої машини.



а б в д

а; б – з повітряним транспортуванням суміші до розподільника; в; д – з роздільним транспортуваннямчастинокта повітряного потоку до місця розташування розподільника;
1 – пневмонасіннєпровід; 2 – розподільник; 3 – лапа; 4 – стояк
Рисунок 5 – Робочі органи з пневматичними розподільними пристроями
Джерело: розроблено авторами

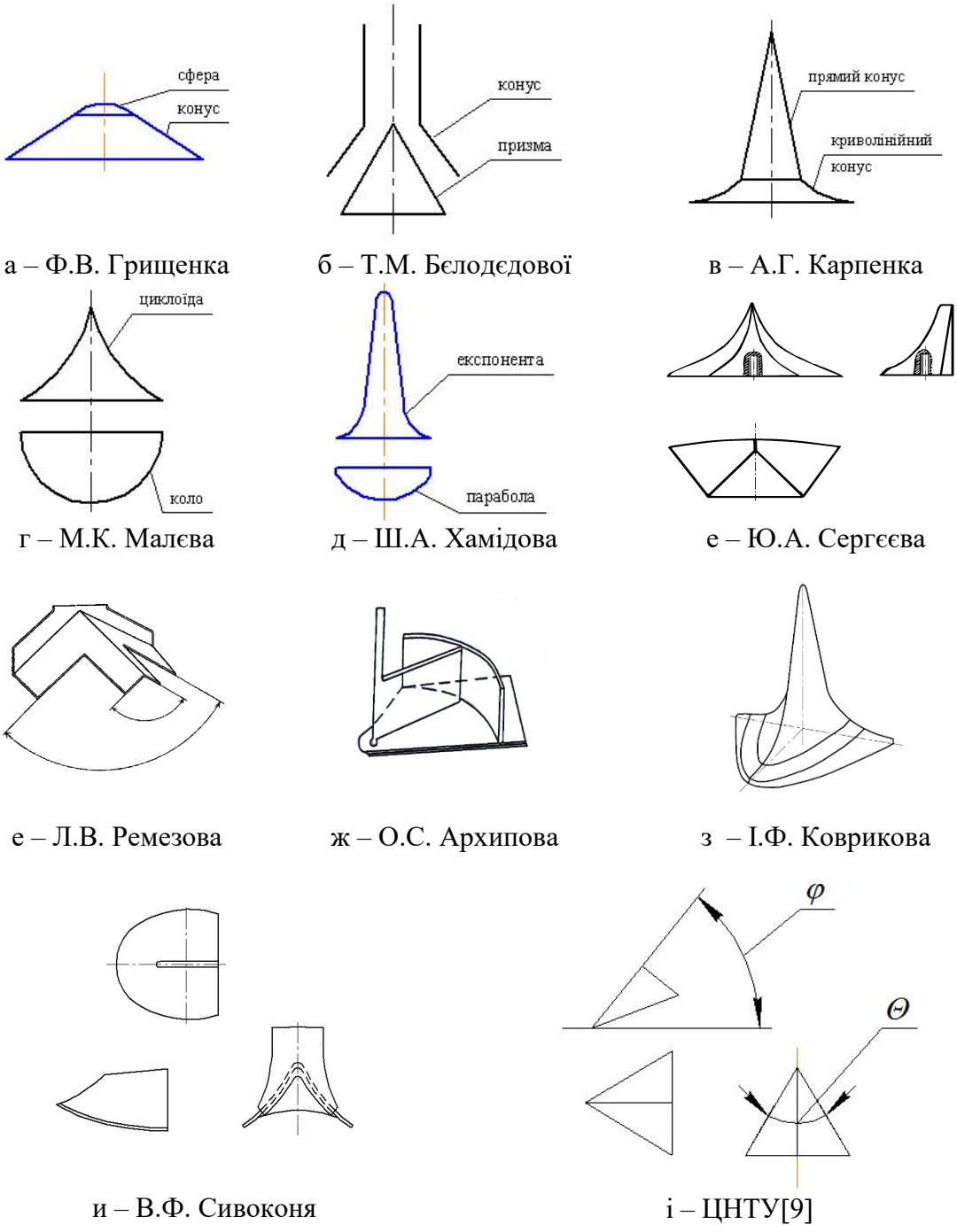
Робочий орган з розподільним пристроєм (рис. 6), розроблений науковим колективом кафедри сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ, складається із стояка, стрілчастої лапи, напрямника, що закріплені позаду стояка,в нижній частині якого розташований розподільник. Посівнтй матеріалчи мінеральні добрива, потрапляючи на розподільник, відбиваються від його поверхні розсіваються в підлаповому просторі смугоюта засипаються шаром ґрунту, що сходить зі стрілчастої лапи. При цьому якість розподілення насіння чи мінеральних добрив забезпечити дуже важко, оскільки матеріали в процесі руху зіштовхуються, що негативно впливає на рівномірність їх розташування на дні борозні в підлаповому просторі.



1 – напрямник, 2 – розподільник, 3 – лапа плоскорізальна; 4 – стояк
Рисунок 6 –Комбінований робочий орган конструкції ЦНТУ
Джерело: розроблено авторами

Кожен з комбінованихробочих органів має власні конструкції розподільних пристроїв, та все ж, проаналізувавши якісні показники їх роботи, можна зробити висновки, що найважливіше значення для рівномірності розподілу посівного матеріалупо ширині захвату лапи, має конструкція саме розподільника.

У залежності від конструкції робочого органа машини і фізико-механічних та механіко-технологічних властивостей матеріалу, що розсівається, а також деяких інших факторів, розроблено велику кількість розподільників для суцільної сівбита внесення добрив (рис. 7).



а – Ф.В. Грищенка б – Т.М. Бєлодєдової в – А.Г. Карпенка

г – М.К. Малєва д – Ш.А. Хамідова е – Ю.А. Сергєєва

е – Л.В. Ремезова ж – О.С. Архипова з – І.Ф. Коврикова

и – В.Ф. Сивоконя і – ЦНТУ[9]

Рисунок7 – Конструкції розподільників різних дослідників

Джерело: розроблено авторами на підставі [2]

Якісні показники роботи розподільників залежать від їх геометричної форми, місця розташування відносно робочого органа, точки сходу вихідного матеріалу та дна борозни. Значна увага приділяється також швидкості, з якою частки потрапляють на розподільник.

Роботи багатьох наукових колективів та авторів присвячувалися вивченню даного питання, створено чимало різноманітних конструкцій розподільників, які забезпечують рівномірний розподілвисіяного матеріалу по площі підлапового простору робочого органа.[2, 3, 6, 7].

В залежності від конструкції розподільники різних видів дозволяють виконувати розсів:

– проти руху машини (заднього розсіву);
– у двох чи трьох напрямках (переднього висіву);
– у всі сторони (кругового висіву).

Розподільники пасивної дії розсівають матеріал, що надходить по напрямнику, під дією гравітаційних сил. В основу конструкції таких розподільників покладено відбиваючу поверхню, яка встановлена в підлаповому просторі під певним кутом до дна борозни.

Більшість розподільників мають складну геометричну форму (рис. 7), що є комбінацією плоских, сферичних, конусних та інших поверхонь. Площа їх робочих поверхонь може бути різною за величиною, в одних випадках вона більша площі напрямника, в інших – менша.

Розподільники активної дії (рис. 3, 4) мають більш складну конструкцію, працюють здійснюючиобертовий чи коливальний рух, привід якого забезпечується стороннім джерелом, також активними вважаються розподільчі пристрої, де для розсіву матеріалу застосовується енергія повітряного потоку, або ж електрична енергія,це потребує включення в конструкцію машини додаткових вузлів(вентиляторів, електрообладнання, пневмопроводів,роторів і т.п.), що значно ускладнює конструкцію робочого органа, враховуючи умови експлуатації сошникової лапи, зростає вірогідність засмічення та забивання рухомих елементів конструкції, що,вцілому,призведе до відмови роботи вузла.

Якщо оцінювати робочі органи для транспортування та розподілення матеріалу при його внутрішньоґрунтовому розміщенні комплексно за трьома основними показниками – простота конструкції, її надійність та забезпечення якісних показників виконання технологічного процесу, то перевагу слід віддавати робочим органам з розподільниками пасивної дії. У даному випадку одночасно забезпечуються перші два показники. Питання ж якості виконання технологічного процесу – рівномірність розподілу матеріалу по ширині захвату робочого органа, на наш погляд, є актуальним, тому потребує більш глибокого вивчення та встановлення основних груп факторів, які впливають на даний показник.

Висновки. Підводячи підсумки аналізу науково-дослідницьких робіт по даній темі, слід відзначити, що у всіх літературних джерелах, де досліджуються конструкції розподільних пристроїв, роботи направлено на адаптацію геометричних параметрів розподільника до конструкційних параметрів того чи іншого ґрунтообробного робочого органа, але відсутні рекомендації щодо використання розподільника на робочих органах з різними параметрами;

Ефективність функціонування робочих органів для суцільноїсівбизалежить від ряду факторів, зокрема, стану вихідного матеріалу, його фізико-механічних і механіко-технологічних властивостей, умов транспортування матеріалу дорозподільного пристрою. Багато дослідників, що займались вирішенням цього питання, підтверджують, що одним з найбільш важливих факторів, які впливають на якість

роботи розподільника є швидкість, з якою частки потрапляють на його поверхню, а також параметри розташування розподільника. Транспортуваннянасіниндо розподільника повітряним потоком є цілком ефективним, але має наступні недоліки, а саме, створення повітряного потоку потребує введення в конструкцію машини вентилятора, якийїї суттєво ускладнює, а також необхідність звільнятись від повітряного потоку в підлаповому просторі, де він викликає видування насінин та їх перерозподіл, використання розподільних пристроїв активного типу ускладнює конструкцію і, відповідно, знижує її надійність.

Суттєвий недолік процесу розподілу матеріалу по ширині захвату плоскорізального робочого органа полягає в тому, що розподільник розглядається як кінцевий фактор і елемент конструкції, від якого залежить основна характеристика процесу – рівномірність розподілу, але в реальних умовах даний показник суттєво перерозподіляється в результаті контакту часток з ґрунтом[2,5,9].

Розглянуті конструкції вдосконалених робочих органів для суцільної сівбиє ефективними, та все ж їх практичне використання виявляється обмеженим, оскільки в одних випадках значно ускладнюється конструкція машин, в інших – конструкції самих розподільників є занадто складними, а їх сфера використання обмежена.

У той же час при сучасних тенденціях в рослинництві, коли все більше використовується комбінованих знарядь, які знижують не лише затрати на отримання врожаю, а й, що не менш важливо, навантаження на ґрунт та довкілля, з екологічної точки зору доводить необхідність подальшого вдосконалення конструкційпосівних знарядь та їх робочих органів.Тому роботи по вдосконаленню конструкцій таких робочих органів та подальші дослідження параметрів та режимів їх функціонування на наш погляд є перспективними.

Список літератури

1. Рудь А. В. Мошенко І. О., Павельчук Ю. Ф Робочий орган сівалки для сівби зернових культур розкидним способом: короткий нарис до 60-річчя. Кам’янець-Подільський: ПДАУ, 2007. С.112.
2. Дейкун В. А. Обґрунтування параметрів робочого органа для внутрішньоґрунтового внесення мінеральних добрив: дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.11. «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / Кіровоград, 2013.
3. Романишин О.Ю., Заєць М.Л., Дейкун В.А. Результати досліджень ефективності суцільної сівби зернових культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 36, ч.1. С. 171-174 http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/archive.html (дата звернення: 01.10.2023).
4. Сало В.М., Васильковський О.М. Аналіз способів внесення мінеральних добрив . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського держ. техн. ун-ту.* 2004. Вип. 14, ч.1. С. 47-51.
5. Гевко Б.М., Павельчук Ю.Ф. Дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтово-розкидному способі сівби: Теоретичний аналіз . *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету* . 2016. Вип. 24(2). С.25-31.
6. Дейкун В.А., Жук Д.Г., Мачок Ю.В. Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2022. Вип. 52. С. 41-47. http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/archive/52.html (дата звернення: 13.10.2023).
7. Романишин О.Ю., Заєць М.Л. Сошник для підгрунтово-розкидного способу сівби зернових культур . *Зб. наук. пр. ХТУСГ ім. Петра Василенка*. 2007. Вип. № 9. С. 238-242.
8. Грунтообробний робочий орган: пат. 25169 Україна :МПК A01B 13/08 № u200703541; заявл. 30.03.2007; опубл. 25.07.2007, бюл. №11.
9. Робочий орган для локального внесення мінеральних добрив чи посіву : пат 129713 МПК A01B 49/06. №u201804789; заявл. 02.05.2018; опубл. 12.11.2018. Бюл. №21.
10. Дейкун В. А. Визначення факторів та параметрів, що впливають на процес розподілу добрив по ширині захвату робочого органа . *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2016. Вип. 4. С. 98-107.

References

1. Rud, A.V. Moshenko, I.O. & Pavelchuk, Yu.F (2007). *Robochyi orhan sivalky dlia sivby zernovykh kultur rozkydnym sposobom: korotkyi narys do 60-richchia* [*Ti agtartrabaho a bagi ti agmula para iti panagmula kadagiti apit a bukbukel babaen ti pamay-an ti panagiwaras: ababa nga sketch para iti maika-60 nga anibersario.]*. Kamianets-Podilskyi: PDAU [in Ukrainian].
2. Deykun, V.A. (2013). Obgruntuvannya parametriv robochoho orhana dlya vnutrishn′ogruntovoho vnesennya mineral′nykh dobryv [Kalintegan dagiti parametro ti agtartrabaho a bagi para iti intrasoil application dagiti mineral fertilizers]. *Candidate's thesis.* Kirovohrad [in Ukrainian].
3. Romanyshyn, O.Yu., Zayets′, M.L. & Deykun, V.A. (2006). Rezul′taty doslidzhen′ efektyvnosti sutsil′noyi sivby zernovykh kul′tur [Resulta ti panagadal iti kinaepektibo ti agtultuloy a panagmula kadagiti apit a bukbukel]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue 36, part 1,* 171-174 . Retrieved from http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/archive.html [in Ukrainian].
4. Salo, V.M. & Vasyl′kovs′kyy, O.M. (2004). Analiz sposobiv vnesennya mineral′nykh dobryv [Panag-analisar kadagiti pamay-an ti panangipakat kadagiti mineral nga abono].*Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. Kirovohrads'koho nats. tekhn. un-tu – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation: coll. of science avenue of Kirovohrad National Technical University, Issue 14, part 1,* 47-51 [in Ukrainian].
5. Hevko, B.M. & Pavel′chuk, Yu.F. (2016). Doslidzhennya protsesu rozpodilu nasinnya zernovykh kul′tur pry pidgruntovo-rozkydnomu sposobi sivby: Teoretychnyy analiz [Panagadal ti proseso ti pannakaiwaras ti bukel dagiti apit a bukbukel iti subsoil-spreading a pamay-an ti panagmula: Teoretikal a panaganalisar]. *Zbirnyk naukovykh prats' Podil's'koho derzhavnoho ahrarno-tekhnichnoho universytetu – Koleksion dagiti sientipiko nga obra ti Podilsk State Agrarian ken Teknikal nga Unibersidad,* Issue 24(2), 25-31 [in Ukrainian].
6. Deykun, V.A., Zhuk, D.H. & Machok, U.V. (2022). Ohlyad sposobiv vnesennya ta efektyvnosti zastosuvannya mineral′nykh dobryv [Panangrepaso kadagiti pamay-an ti pannakaiyam-ammo ken kinaepektibo dagiti mineral nga abono]. *Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Issue* 52 , 41-47. Retrieved from http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/archive/52.html [in Ukrainian].
7. Romanyshyn, O.Yu. & Zayets′, M.L. (2007). Soshnyk dlya pidhruntovo-rozkydnoho sposobu sivby zernovykh kul′tur [Coulter para iti subsoil-spread a pamay-an ti panagmula kadagiti apit a bukbukel]. *Zb. nauk. pr. KHTUS·H im. Petra Vasylenka – Coll. dagiti sientipiko nga obra ni Petro Vasylenko KhTUSH*, *Issue 9* , 238-242 [in Ukrainian].
8. Shmat, S.I., Luzan, P.H., Machok, Yu.V., Deikun, O.V. & Tepliuk, A.O. (2007). Hruntoobrobnyi robochyi orhan [Tillage nga agtartrabaho a bagi]. pat. 25169 Ukraina :MPK A01B 13/08 № u200703541; zaiavl. 30.03.2007; opubl. 25.07.2007, biul. № 11 [in Ukrainian].
9. Deikun, V.A., Salo, V.M. Leshchenko, S.M., Poliukhovych, A.V. (2018). Robochyi orhan dlia lokalnoho vnesennia mineralnykh dobryv chy posivu [Working body para iti lokal a pannakaipakat ti mineral fertilizers wenno panagmula]. pat 129713 MPK A01B 49/06. №u201804789; zaiavl. 02.05.2018; opubl. 12.11.2018. Biul. №21 [in Ukrainian].
10. Deykun, V.A. (2016). Vyznachennya faktoriv ta parametriv, shcho vplyvayut′ na protses rozpodilu dobryv po shyryni zakhvatu robochoho orhana *[Panangikeddeng kadagiti banag ken parametro a mangapektar iti proseso ti pannakaiwaras ti abono iti kalawa ti agtartrabaho a bagi]*. *Visnyk Ukrayins'koho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi ahrarnoyi osvity – Bulletin ti sanga ti Ukraine ti Internasional nga Akademia ti Agrario nga Edukasion*, *Issue 4*, 98-107 [in Ukrainian].

Viktor Deikun, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Volodymyr Kropivnyy**, Prof., PhD tech. sci,
Roman Moskalchenko, post graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Sowing Methods, Prospects for Improvement

One of the most important technological measures in agricultural production is the sowing of agricultural crops. Therefore, it is important to choose a sowing method that will create optimal conditions for the germination and development of the seeds of cultivated plants. Sowing methods depend on the biological characteristics of crops (different crops are not equally demanding on soil fertility, the amount of heat, lighting, humidity, etc.). One of the main requirements for sowing methods is the creation of optimal sowing density, which ensures the most intensive growth of the assimilation leaf surface - the main factor of yield.

Scientists have conducted a number of studies, developed designs of combined working bodies of sowing machines and distribution devices for transporting and distributing seed material along the width of the coulter, identified the main shortcomings and proposed ways to simplify them and improve the quality of work

when sowing seeds of grain crops. However, the problem of increasing the efficiency of using the entire design width of the coulters can be successfully solved if the mathematical justification of the technological parameters of the elements of the working body is applied.

The purpose of the article is to conduct an analysis of sowing methods, to carry out a literature and patent review of the constructions of combined working bodies for shelf-free tillage with simultaneous subsoil-broadcasting of grain crops or in-soil application of mineral fertilizers, analysis of the constructions of distribution devices of various authors and the efficiency of their use.

If you evaluate the working bodies for transporting and distributing the material when it is placed in the soil comprehensively according to three main indicators: the simplicity of the design, its reliability and ensuring the quality indicators of the execution of the technological process, then preference should be given to the working bodies with distributors of passive action. In this case, the first two indicators are simultaneously provided. In our opinion, the issue of the quality of the execution of the technological process - the uniformity of the distribution of the material along the width of the working body is urgent, therefore it requires a deeper study and the establishment of the main groups of factors that affect this indicator.

A significant drawback of most theoretical studies of the process of material distribution along the grip width of a flat-cutting working body is that the distributor is considered as a final factor and a structural element on which the main characteristic of the process depends - the uniformity of distribution, but in real conditions this indicator is significantly redistributed as a result of particle contact with soil.

At the same time, with modern trends in the field of tillage, its minimization, when more and more combined tools are used, which reduce not only the cost of obtaining a crop, but also, what is no less important, the load on the soil and the environment, from an ecological point of view, it proves the necessity further improvement of the designs of combined weapons and their working bodies. Therefore, in our opinion, work on improving the structures of such working bodies and further research into the parameters and modes of their functioning are promising.

sowingmethods, continuoussowing, combined, ground-spreading, guide, distributor, distribution

Одержано (Received) 01.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 16.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.356.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.227-236

А.В. Бабій, проф., д-р техн. наук, **І.В. Головецький,** асп., **Ю.Б. Гладьо,** доц., канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: avbabiytntu@gmail.com

Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми

В роботі запропоновано нову конструкцію вібраційного лемеша картоплекопача, який конструктивно виконаний таким чином, що має можливість низки регулювань. В даному конструктивному рішенні можна змінювати величину кривошипа приводу, довжини ланок шарнірних підвісів та встановлювати на диску кривошипа противагу для зрівноважування механізму. Це дозволяє забезпечити полегшене проникнення лемеша у грунт, створити направлений рух бульбоносної маси та покращити сепарацію вже під час підкопування. Представлену конструкцію вібраційного лемеша аналітично описано за допомогою методу замкнених векторних контурів та виконано кінематичний аналіз такого багатоланкового механізму з використанням спеціально розробленої комп'ютерної програми, що дозволяє моделювати та аналізувати можливі рухи точок ланок вібраційного лемеша.

картопля, ґрунт, бульбоносний пласт, вібраційний леміш, картоплекопач, підкопування, сепарація, вібраційний рух, багатоланкова шарнірна система, кінематичний аналіз, кривошип

© А.В. Бабій, І.В. Головецький, Ю.Б. Гладьо, 2023

Постановка проблеми. Україна посідає провідне місце у світовому рейтингу виробників картоплі. Дані служб статистики обласних адміністрацій вказують на те, що левова частка цього продукту виробляється саме в домогосподарствах чи невеликих фермерських господарствах. Наприклад, у звіті Львівської обласної адміністрації за 2021 рік вказано, що «Основне виробництво картоплі на Львівщині зосереджено в домогосподарствах…» [13].

Ці факти свідчать про те, що в таких господарствах є потреба, як правило, у малогабаритній ефективній техніці. Від ступеня механізації дрібних господарств напряму залежить рівень культури агровиробництва. Не винятком є і картоплярство. Особливо трудомісткою є технологічна операція збирання картоплі. Постійне удосконалення робочих органів картоплезбиральних машин залишається актуальною задачею машинобудівників та агроінженерів [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За аналізом літературних джерел [1-4, 6, 9, 15], автори розглядають проблеми підкопування та сепарації коренебульбоплодів. Задачі полягають у зменшенні тягових опорів при підкопуванні бульбоносного пласту ґрунту, підвищенні ефективності сепарації ґрунту на пруткових подовжувачах лемеша і далі на різного роду очисниках. В працях [10, 12] пропонуються рішення щодо нових підходів у технології вирощування картоплі через формування сприятливого ґрунтового середовища для розвитку рослини. Такі зміни матимуть неодмінний вплив і на технологічну операцію збирання картоплі.

Разом з тим, отримані обґрунтовані рішення, в більшій мірі, стосуються професійних картоплекопачів, а малогабаритні картоплезбиральні машини виготовляють спрощеної конструкції [7, 8], що часто відображається на ефективності їх роботи. Тому варто напрацювати нові конструкторські рішення для удосконалення малогабаритної техніки, яка приймає на себе левову частку при виробництві картоплі в Україні.

Постановка завдання. Як показує практика, виробники малогабаритних картоплекопачів максимально спрощують конструкції, не допускаючи збільшення їх вартості, рис. 1. Це з одного боку є виправданим кроком, але з іншого – представлені на ринку машини, на думку авторів, не завжди мають задовільні показники ефективності роботи.



Рисунок 1 – Світлини типових конструкції картоплекопачів із вібраційними лемешами

Джерело: [14]

Наприклад, наведені в роботі [14] малогабаритні картоплекопачі – це відносно надійні машини, але вібраційний рух лемеша можливий тільки відносно осі обертання, тобто точки шарнірного закріплення лемеша до рами машини. Це не дозволяє забезпечити заданий закон руху різального леза для ефективного підкопування та сепарації бульбоносного пласту.

Тому є необхідність, незначно ускладнюючи конструкцію, забезпечити для лемеша більше можливих рухів з метою полегшеного його проникнення в бульбоносний пласт ґрунту, утворення направленого руху підкопаної маси та інтенсивнішої її сепарації.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації поставленого завдання було запропоновано нову конструкцію вібраційного лемеша, яка реалізовуватиметься в схемі картоплекопача.

Представлена конструкція вібраційного лемеша (рис. 2) відрізняється від наведених на рис. 1 тим, що кривошип виконано у вигляді диска 13, у якому в радіальному напрямку зроблено паз 12, де на заданій відстані від осі обертання фіксується з'єднувальний шарнір 11 шатуна 10. Це забезпечує можливість встановлювати потрібну величину кривошипа для приводу лемеша. Крім того, в такого роду копачів існує проблема динамічної незрівноваженості, що викликає значні його вібрації, тому у диску кривошипа 13 концентрично виконано отвори 15 для закріплення зрівноважувальної противаги 16. Інша відмінність вібраційного лемеша полягає в тому, що різальне лезо 1 з прутковими подовжувачами 2 закріплене на двох парах шарнірних підвісів 3 і 4. Передні підвіси 3 мають визначену довжину та шарнірно з'єднані з різальним лезом 1 та рамою 5. Задня пара шарнірних підвісів 4 має для приєднання до рами 5 регулювальні отвори 7. Ці підвіси 4 з'єднані між собою поперечиною 6 у жорстку рамку, посередині якої закріплено кронштейн 9 з отворами 8 для з'єднання з кривошипом 10.

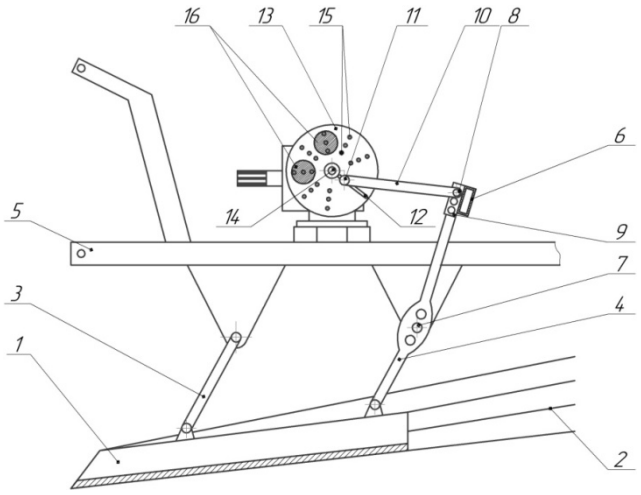


Рисунок 2 – Принципова схема вібраційного лемеша в конструкції картоплекопача
Джерело: розроблено авторами

Далі детальніше розглянемо будову та принцип роботи представленої конструкції вібраційного лемеша, рис. 2.

Приводний вал 14 отримує крутний момент від енергетичного засобу, наприклад через конічний редуктор та від ВВП енергозасобу. Разом із приводним валом 14 обертається диск кривошипа 13, в пазі 12 якого зафіксований з'єднувальний шарнір 11 на заданій відстані від осі обертання, що утворює величину радіуса кривошипа. Приєднавши до з'єднувального шарніра 11 шатун 10, через який передається зусилля на поперечину 6, при їх з'єднанні в одному з отворів 8 у кронштейні 9, а відповідно і передається на пару шарнірних підвісів 4. Фіксація шарнірних підвісів 4 у середній частині з допомогою одного із регулювальних отворів 7

до рами 5 дає можливість отримати ефект важеля. Вибираючи один із регулювальних отворів 7 для приєднання до рами 5, регулюють величину нижнього плеча пари шарнірних підвісів 4. Аналогічним чином можна змінювати величину верхнього плеча пари шарнірних підвісів 4, вибираючи для з'єднання з шатуном 10 один із отворів 8 у кронштейні 9 на поперечині 6. Таким чином, парою шарнірних підвісів 4 передається зусилля до різального леза 1 з прутковими подовжувачами 2, що викликає їх переміщення при утворенні багатоланкової шарнірної системи, яка може забезпити визначений закон руху площини різального леза 1 лемеша.

При виконанні машиною технологічного процесу викопування картоплі утворений вібраційний леміш різальним лезом 1 входить у бульбоносний пласт, підрізає його, а вібраційні зворотно-поступальні рухи утворюють ефект псевдорозрідженого середовища, що полегшує проникнення різального леза 1 у непідкопаний бульбоносний пласт. Змінюючи положення з'єднувального шарніра 11 у пазі 12 диска кривошипа 13, тобто величину кривошипа, а також величини плечей пари шарнірних підвісів 4 з допомогою відповідних регулювальних отворів 7 і отворів 8 у кронштейні 9, можна забезпечити заданий закону руху площини різального леза 1 з прутковими подовжувачами 2. Це має визначальне значення щодо можливості ефективного підкопування бульбоносного пласту, наприклад амплітуда коливань різального леза 1, а також можливості направленого транспортування підкопаної маси утвореною коливною площиною з можливістю одночасної сепарації на пруткових подовжувачах 2.

Оскільки вихідна ланка утвореного вібраційного лемеша картоплекопача здійснює зворотно-поступальні рухи, то така система буде незбалансованою і утворені вібрації всієї машини будуть передаватися на енергетичний засіб, а відповідно і людину, яка ним керує. Тому для усунення такого недоліку в конструкції вібраційного лемеша картоплекопача передбачено використання диска кривошипа 13, який виконує роль маховика, а закріплена зрівноважувальна противага 16 у визначених концентрично розміщених отворах 15 дозволяє частково збалансувати утворену динамічну систему. Величина маси зрівноважувальної противаги 16 та місце її розміщення на диску кривошипа 13 визначаються додатковими розрахунками та корегуються в процесі експлуатації.

На рис. 2 наведено принципову схему вібраційного лемеша картоплекопача, яка дає уяву про його принцип роботи та основні регулювання. Але щоб перейти до конструктивних розрахунків та розробки робочих креслень складових, необхідно виконати спочатку кінематичний аналіз такого механізму. З цією метою представимо узагальнену кінематичну схему (рис. 3).

Для кінематичного аналізу такого багатоланкового механізму (рис. 3) досить простим та ефективним є метод замкнених векторних контурів [11].

Як видно, цей механізм складається із двох контурів: O_1ABO_2 та O_2CDO_3.

Позначимо векторами відповідні ланки:

- $\vec{l}_1$ – кривошип;
- $\vec{l}_2$ – шатун;
- $\vec{l}_3$ – верхнє плече пари шарнірних підвісів 4 (рис. 2);
- $\vec{l}_4$ – нижнє плече пари шарнірних підвісів 4 (рис. 2);
- $\vec{l}_5$ – леміш;
- $\vec{l}_6$ – пара шарнірних підвісів 3 (рис. 2).

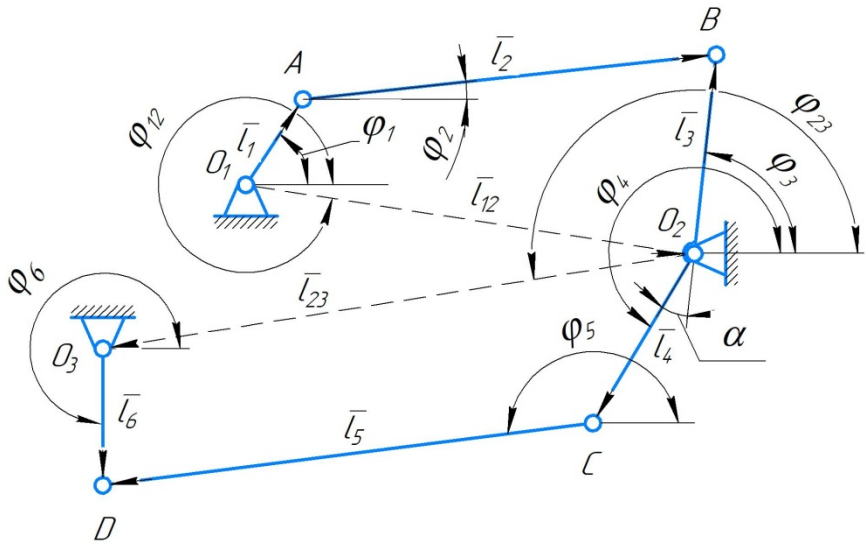


Рисунок 3 – Кінематична схема вібраційного лемеша

Джерело: розроблено авторами

Вектори $\vec{l}_{12}$ та $\vec{l}_{23}$ з'єднують центри обертання ланок O_1O_2 та O_2O_3, відповідно. Тоді векторні рівняння для кожного з контурів запишемо у вигляді:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_{12} + \vec{l}_3; \tag{1}$$

$$\vec{l}_4 + \vec{l}_5 = \vec{l}_{23} + \vec{l}_6. \tag{2}$$

Спроєктуємо ці рівняння на осі ортогональної системи XOY, вважаючи відомими довжини ланок та координати центрів обертання: $O_1(x_1, y_1)$, $O_2(x_2, y_2)$ та $O_3(x_3, y_3)$. Кожна ланка має кут нахилу до осі OX, який позначимо φ_i, i – індекс, що відповідає номеру ланки (рис. 3). В проєкціях на осі, отримаємо:

$$\begin{cases} l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\varphi_2 = l_3 \cos\varphi_3 + l_{12} \cos\varphi_{12}, \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\varphi_2 = l_3 \sin\varphi_3 + l_{12} \sin\varphi_{12}; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} l_4 \cos\varphi_4 + l_5 \cos\varphi_5 = l_6 \cos\varphi_6 + l_{23} \cos\varphi_{23}, \\ l_4 \sin\varphi_4 + l_5 \sin\varphi_5 = l_6 \sin\varphi_6 + l_{23} \sin\varphi_{23}; \end{cases} \tag{4}$$

Очевидно, що тут існує взаємозв'язок:

$$l_{12} \cos\varphi_{12} = x_2 - x_1;$$

$$l_{12} \sin\varphi_{12} = y_2 - y_1;$$

$$l_{23} \cos\varphi_{23} = x_3 - x_2;$$

$$l_{23} \sin\varphi_{23} = y_3 - y_2.$$

Звідки отримаємо наступні залежності:

$$\begin{cases} l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\varphi_2 = l_3 \cos\varphi_3 + (x_2 - x_1), \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\varphi_2 = l_3 \sin\varphi_3 + (y_2 - y_1); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} l_4 \cos\varphi_4 + l_5 \cos\varphi_5 = l_6 \cos\varphi_6 + (x_3 - x_2), \\ l_4 \sin\varphi_4 + l_5 \sin\varphi_5 = l_6 \sin\varphi_6 + (y_3 - y_2); \end{cases} \quad (6)$$

Між кутами φ_3 і φ_4 існує конструктивний кінематичний зв'язок

$$\varphi_4 = \varphi_3 + (\pi - \alpha). \quad (7)$$

Кут повороту кривошипа φ_1 відомий, решта кутових параметрів знаходимо із розв'язку систем рівнянь (5) і (6).

Після перетворень отримаємо:

$$\varphi_3 = arcsin\left(\frac{c_1}{q_1}\cos\gamma_1\right) - \gamma_1; \quad (8)$$

$$\varphi_2 = arcsin\left(\frac{q_1 + l_3 \sin\varphi_3}{l_2}\right); \quad (9)$$

$$\varphi_6 = arcsin\left(\frac{c_2}{q_2}\cos\gamma_2\right) - \gamma_2; \quad (10)$$

$$\varphi_2 = arcsin\left(\frac{q_2 + l_6 \sin\varphi_6}{l_5}\right); \quad (11)$$

де $u_1 = x_2 - x_1 - l_1 \cos\varphi_1$; $q_1 = y_2 - y_1 - l_1 \sin\varphi_1$; $u_2 = x_3 - x_2 - l_4 \cos\varphi_4$;

$q_2 = y_3 - y_2 - l_4 \sin\varphi_4$; $c_1 = \frac{l_2^2 - l_3^2 - u_1^2 - q_1^2}{2l_3}$; $c_2 = \frac{l_5^2 - l_6^2 - u_2^2 - q_2^2}{2l_6}$; $\gamma_1 = arctg\frac{u_1}{q_1}$;

$\gamma_2 = arctg\frac{u_2}{q_2}$.

Таким чином описано основні кінематичні зв’язки між ланками утвореного механізму, що дозволяє аналізувати його кінематичні параметри.

Метою такого дослідження є вибір раціональних конструктивних параметрів механізму вібраційного лемеша картоплекопача, які забезпечуватимуть ефективний енергозберігаючий режим роботи одночасно з високою продуктивністю підкопування та сепарацією бульбоносного пласту.

Задача є доволі складною, якщо для її реалізації не застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення. Тому для проведення досліджень створена комп'ютерна програма розрахунку, за допомогою якої можна змінювати параметри ланок механізму з візуалізацією їх руху та отримувати графіки переміщень, швидкостей і прискорень досліджуваних точок механізму тощо.

На рис. 4 наведено візуалізовані результати дослідження кінематичних параметрів розробленого вібраційного лемеша картоплекопача.

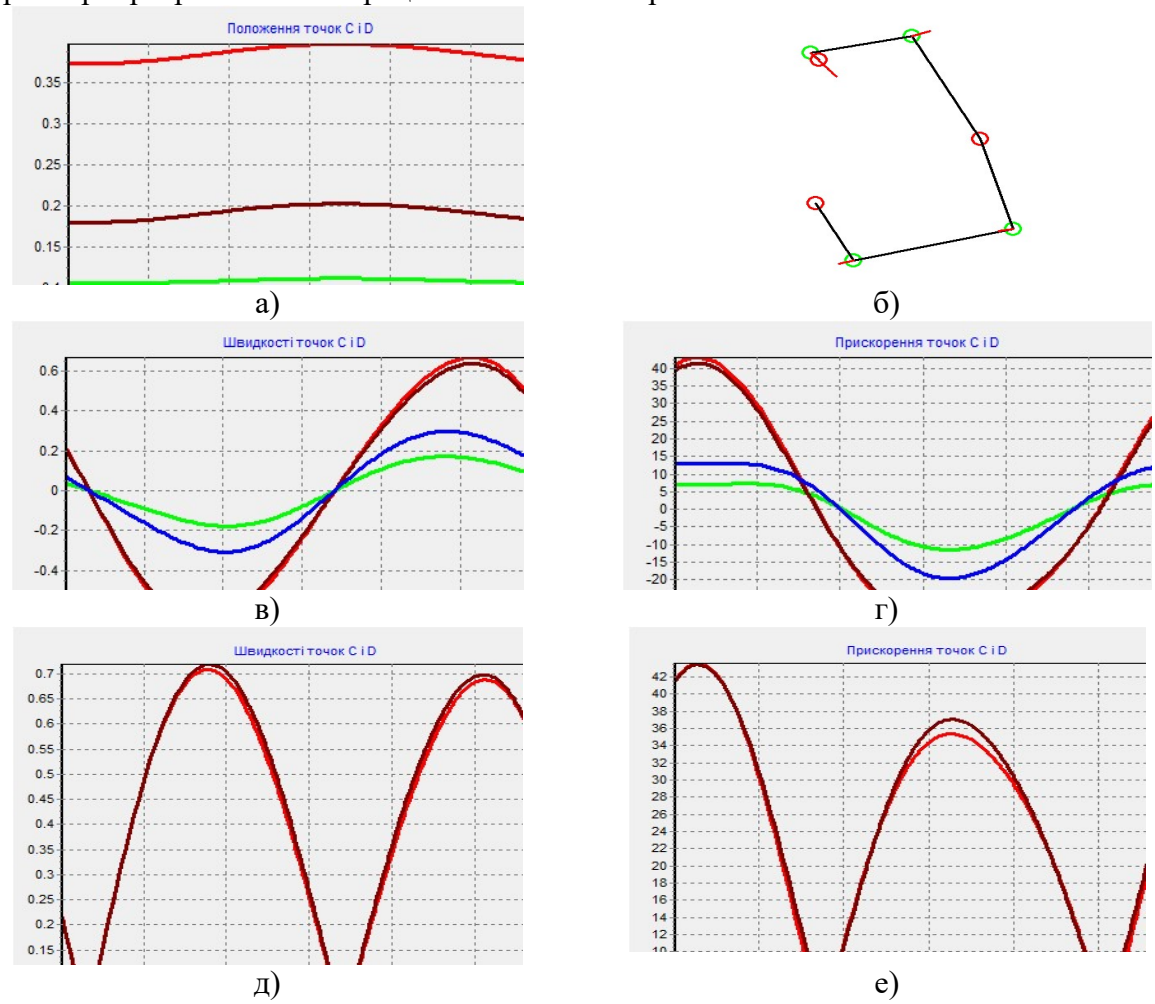


Рисунок 4 – Візуалізація кінематичних параметрів при роботі вібраційного лемеша

Джерело: розроблено авторами

Наведені графічні залежності (рис. 4) кінематичних параметрів характерних точок ланок визначені при частоті обертання кривошипа 540 об/хв. Геометричні розміри ланок, координати розміщення шарнірів їх обертання прийнято конструктивно та піддано аналізу з допомогою розробленої комп'ютерної програми. На рис. 4: а – переміщення точок ланок в абсолютних координатах; б – скріншот анімації руху ланок; в, г – швидкості та прискорення точок в проєкціях на координатні осі; д, е – абсолютні швидкості та прискорення точок. Отримані результати дозволяють, наклавши певні умови, віднайти раціональні параметри розробленого вібраційного лемеша картоплекопача.

Висновки. Таким чином, за виконаним аналізом літературних та інших джерел інформації було встановлено недоліки базових конструкцій вібраційних лемешів малогабаритних картоплекопачів. Як вирішення поставленої задачі було запропоновано

нову конструкцію вібраційного лемеша картоплекопача, який може забезпечити необхідні регулювання з метою зміни амплітуди підкопування від 10 мм до 35 мм, утворення направленого руху маси бульбоносного пласта площиною лемеша у діапазоні частот обертання приводного вала від 300 об/хв – 600 об/хв, що підвищить ефективність сепарації та дасть можливість агрегатування з різними енергетичними засобами, що мають відмінні частоти обертання ВВП. А можливість часткового балансування динамічної системи при використанні зрівноважувальної противаги підвищить ресурс роботи механізму приводу в цілому.

Утворений багатоланковий механізм, його кінематичні параметри, описано рівняннями на основі методу замкнених векторних контурів. Для числової реалізації результатів та їх візуалізації, а також визначення раціональних параметрів запропонованого механізму розроблено спеціальну комп'ютерну програму, що дає можливість досліднику здійснювати пошук в автоматизованому режимі.

Список літератури

1. Baranovsky V.M., Onishchenko V.B., Solomka V.O. Improvement directions of separating working parts of the root tubers machines, *Scientific journal: The works of the NAU "Mechanization of agricultural production"*, 2002. Vol. XII, pp. 31-42, Kyiv.
2. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z., Olt J. Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research.* 2018. 16(1). Pp. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037.
3. Firman Yu., Hrushetsky S., Investigation and substantiation of the parameters of the potato digger with a drum separator of potato tubers and residues. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol. 17, No 1. Pp. 17-26, Lublin / Poland.
4. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak V.L., Kurylo V.M. Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59. № 3. pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11.
5. Бабій А.В., Головецький І.В., Герасимович П.В. Проблеми та перспективи розвитку картоплярства в Україні. *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X-ої Міжн. наук.-практ. конф. молодих учених та студ.* (Тернопіль). 2021. Т.1. С. 25-26.
6. Розрахункова математична модель руху частинок вороху при вібраційному очищенні картоплі від домішок. / Булгаков В.М. та ін. *Вісник аграрної науки* . 2022. №2 (827). 58-65.
7. Головецький І.В., Бабій А.В. Аналіз конструктивних особливостей найпростіших картоплекопачів. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики : матеріали Міжн. наук.-практ. конф. (*Тернопіль, 29-30 вересня 2022 р.). С. 49-50.
8. Головецький І.В., Бабій А.В. Аналіз типу приводу робочих органів картоплекопача. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем (Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems): Матеріали IV Міжн. наук.-практ. конф. (*13-15 квітня 2022 р. , Кропивницький), 2022. С.100-102.
9. Грушецький С.М., Рудь А.В., Семенишина І.В., Медведєв Є.П. The technological process pattern of potato root harvester. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка : журнал*. 2019. № 31. С. 52-60. DOI: 10.37406/2706-9052-2019-2-7.
10. Дідух В.Ф., Цизь І.Є., Тарасюк В.В., Данилюк В. М., Тарасюк Д.В. Особливості вирощування картоплі в умовах полісся з використанням місцевих добрив. *Технічний прогрес в АПВ : Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф.,* 2023. С. 95-98.
11. Кіницький Я.Т. Короткий курс теорії механізмів і машин: підр. для інж.-тех. спец. вищих закл. України. 2-е вид., переобл. і скор. Львів: *Афіша*, 2004. 272 с.
12. Обґрунтування вирощування картоплі за технологією Streep-Till. / В.І. Пастухов. *Інженерія природокористування.* 2020. № 2 (16). С. 25-32.
13. У Львові напрацьовували рішення задля підтримки галузі картоплярства : веб-сайт. URL : https://old.loda.gov.ua/news?id=60096 (дата звернення: 04.10.2023).
14. Характеристики та вибір картоплекопачів для міні-трактора : веб-сайт. URL : https://gardenunion.com.ua/kartoplekopach-dlja-mini-traktoriv-41 (дата звернення: 05.10.2023).

15. Шимко А.В. Обґрунтування параметрів підкопувальної частини нового робочого органу для картоплекопачки. *The newest problems of science and ways to solve them : The XXX International Scientific and Practical Conference*, (August 02 – 05, 2022, Helsinki, Finland), 2022. Pp. 265-269.

References

1. Baranovsky, V.M., Onishchenko, V.B. & Solomka, V.O. (2002). Improvement directions of separating working parts of the root tubers machines. *Scientific journal: The works of the NAU "Mechanization of agricultural production"*, *Vol. XII,* pp. 31-42 [in English].
2. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Adamchuk, V.Z. & Olt, J. (2018). Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research. 16(1),* pp. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037 [in English].
3. Firman, Yu. & Hrushetsky, S. (2015). Investigation and substantiation of the parameters of the potato digger with a drum separator of potato tubers and residues. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, *Vol. 17, No 1*, pp. 17-26, Lublin / Poland [in English].
4. Hrushetsky, S.M., Yaropud, V.M., Duganets, V.I., Duganets, V.I., Pryshliak, V.L. & Kurylo, V.M. (2019). Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering, Vol. 59, № 3,* pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11 [in English].
5. Babii, A.V., Holovetskyi, I.V &, Herasymovych, P.V. (2021). Problemy ta perspektyvy rozvytku kartopliarstva v Ukraini [Problems and prospects of the development of potato growing in Ukraine]. *Zbirnyk tez dopovidei Kh-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv „Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii"*. (Ternopil), *Vol. A. Issue 1*, 25-26 [in Ukrainian].
6. Bulhakov, V.M., Holovach, I.V., Ruzhylo, Z.V., Korniushyn, V.M., Ihnatiev, Ye.I. & Andriievska, M.A. (2022). Rozrakhunkova matematychna model rukhu chastynok vorokhu pry vibratsiinomu ochyshchenni kartopli vid domishok [A calculated mathematical model of the movement of pile particles during the vibratory cleaning of potatoes from impurities]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Herald ti Siensia ti Agrario, 2 (827),* 58-65 [in Ukrainian].
7. Holovetskyi, I.V. & Babii, A.V. (2022). Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei naiprostishykh kartoplekopachiv [Analysis of the design features of the simplest potato diggers]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Protsesy, mashyny ta obladnannia ahropromyslovoho vyrobnytstva: problemy teorii ta praktyky»*. (Ternopil, 29-30 veresnia 2022), 49-50 [in Ukrainian].
8. Holovetskyi, I.V. & Babii, A.V. (2022). Analiz typu pryvodu robochykh orhaniv kartoplekopacha [Analysis of the type of drive of the potato digger working elements]. *Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems"*, (13-15 kvitnia 2022 r. Kropyvnytskyi), 100-102 [in Ukrainian].
9. Hrushetskyi, S.M., Rud, A.V., Semenyshyna, I.V. & Medvediev, Ye.P. (2019). The technological process pattern of potato root harvester. *Zhurnal «Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika»*. № 31. Kamianets-Podilskyi. DOI: 10.37406/2706-9052-2019-2-7 [in Ukrainian].
10. Didukh, V.F., Tsyz, I.Ie., Tarasiuk, V.V., Danyliuk, V. M. & Tarasiuk, D.V. (2023). Osoblyvosti vyroshchuvannia kartopli v umovakh polissia z vykorystanniam mistsevykh dobryv [Features of growing potatoes in Polissya conditions using local fertilizers]. *Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Tekhnichnyi prohres v APV»*, 95-98 [in Ukrainian].
11. Kinytskyi, Ya.T. (2004). Korotkyi kurs teorii mekhanizmiv i mashyn [A short course in the theory of mechanisms and machines]. 2-d ed. Lviv: *Afisha* [in Ukrainian].
12. Pastukhov, V. I., Kyrychenko, R. V., Bakum, M. V., Krekot, M. M., Mohylna, O. M., Melnyk, O. V. et al. (2020). Obgruntuvannia vyroshchuvannia kartopli za tekhnolohiieiu Streep-Till [Justification for growing potatoes using the Streep-Till technology. Environmental Engineering]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia – Inhenieria ti panangtarawidwid iti nakaparsuaan, № 2 (16),* 25-32 [in Ukrainian].
13. U Lvovi napratsovuvaly rishennia zadlia pidtrymky haluzi kartopliarstva [Solutions were developed in Lviv to support the potato growing industry]: veb-sait. *old.loda.gov.ua.* Retrieved frpom https://old.loda.gov.ua/news?id=60096 [in Ukrainian].
14. Kharakterystyky ta vybir kartoplekopachiv dlia mini-traktora [Characteristics and selection of potato diggers for a mini tractor]: veb-sait. *gardenunion.com.ua.* Retrieved frpom https://gardenunion.com.ua/kartoplekopach-dlja-mini-traktoriv-41 [in Ukrainian].
15. Shymko, A.V. (2022). Obgruntuvannia parametriv pidkopuvalnoi chastyny novoho robochoho orhanu dlia kartoplekopachky [Justification for the parameters of the digging part of the new working element for

the potato digger]. *The XXX International Scientific and Practical Conference «The newest problems of science and ways to solve them»*, (August 02 – 05, 2022, Helsinki, Finland), 265-269 [in Ukrainian].

Andrii Babii, Prof., DSc., **Ivan Holovetskyi,** post-graduate**, Yurii Hlado,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Research of Kinematic Parameters of the Vibrating Ploughshare of a Potato Digger Using a Computer Program

Statistical data show that a significant share of potatoes is grown in subsidiary farms in Ukraine, so there is a need for small-sized, efficient equipment. The level of agricultural culture directly depends on the degree of mechanization of small farms. The purpose of the work is to improve the design of a small-sized potato harvester while increasing the efficiency of its ploughshare.

A new design of a vibrating ploughshare in the design of a small-sized potato digger is proposed, which differs from typical designs in that the crank is made in the form of a disk, in which a groove is made in the radial direction. The connecting rod connecting hinge is fixed in the groove at a given distance from the axis of rotation. This provides an opportunity to set the required crank size for driving the ploughshare.

In addition, this type of diggers has the problem of significant vibrations. Therefore, the crank disk has concentrically made holes for fixing the counterweight for partial balancing. Another difference of the vibrating ploughshare is that the cutting blade with rod extensions that is secured on two pairs of hinge suspensions. The front hangers have a certain length and are hinged to the cutting blade. Rear pair of hinge suspensions has made adjusting holes in middle part for connection to frame.

These suspensions are connected to each other by a crossbar in a rigid frame, in the middle of which is fixed a bracket with holes for connection with a crank. Such a ploughshare will make it easier to penetrate the soil, better self-cleaning, create a directed movement of the soil mass with potatoes and carry out primary separation more intensively. The kinematic movements of such a vibrating ploughshare are described using the method of closed vector contours, and the numerical implementation of the mathematical model is done using the author's computer program.

Thus, the new design of the vibrating ploughshare of the potato digger can provide the necessary regulation in order to change the digging amplitude, create a directional movement of the soil and potato mass and increase the efficiency of separation, as well as the possibility of partial balancing of the dynamic system when using a counterweight.

The kinematic parameters of the formed multipurpose mechanism are described by equations based on the method of closed vector contours. For the numerical implementation of the results and their visualization, as well as the determination of the rational parameters of the proposed mechanism, a special computer program has been developed, which enables the researcher to perform a search in an automated mode.

potato, soil, tuberous layer, vibrating ploughshare, potato digger, digging, separation, vibration movement, multipurpose hinge system, kinematic analysis, crank

Одержано (Received) 17.10.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 09.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК631.362.3 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246

О. Задорожній, асп., **С.М. Мороз,** доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський,** проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e–mail: serhii_moroz@ukr.net

Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення

В статті наведені результати аналізу сучасних конструкцій очисних пристроїв плоских коливальних решіт зерноочисних машин загального призначення. Аналіз існуючих конструкцій показав, що в переважній більшості конструкцій машин вони встановлені з боку неробочого боку поверхонь сепарації. Встановлено, що більш раціональним буде застосування комбінованого за призначенням пристрою, який дозволяє не тільки очищати отвори решіт від застряглих в них часток, але, одночасно з цим, здійснювати транспортування часток зернового матеріалу по робочій поверхні решіт здовж його отворів.
зерноочисні машини загального призначення, решето, очисник решета

Постановка проблеми. Виробники сільськогосподарської техніки як в цілому світі, так і в Україні, працюють в умовах жорсткої конкуренції. Нажаль, якість нашої сільськогосподарської техніки не може конкурувати з якістю світових виробників, особливо з розробками лідерів цієї галузі.

Зерноочисні машини відіграють значну роль при переході оброблюваного матеріалу від зібраного збіжжя зернових, бобових, круп'яних культур, соняшнику та насіння трав до сировини переробної промисловості. Від налаштувань їх робочих органів в значній мірі залежить якість та тривалість зберігання сировини для виготовлення різноманітних продуктів, відмінних за своїм призначенням.

Зерноочисні машини загального призначення мають робочі органи, що розділяють зерновий матеріал на різні фракції за кількома властивостями та параметрами. Для виділення з нього дрібної та крупної фракції використовують різні види плоских коливальних решіт. Найбільш поширеними є решета з продовгуватими отворами.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Якість розділення зернового матеріалу зерноочисними машинами, в основному, залежить від якості роботи поверхонь сепарації. Відомо, що для проходження прохідної частки крізь отвір решітної поверхні, їй потрібно не тільки зорієнтуватися та потрапити у нього, але й щоб отвір мав таку довжину, яка дає можливість їй пройти крізь нього. Але крім прохідних часток зерновий матеріал має частки, товщини яких дещо більші за ширину отворів. Такі частки можуть застрягати в отворах та перешкоджати прохідним часткам проходити крізь поверхню сепарації. Для видалення застряглих часток з отворів решіт використовуються очисні пристрої.

© О. Задорожній, С.М. Мороз, О.М. Васильковський, 2023

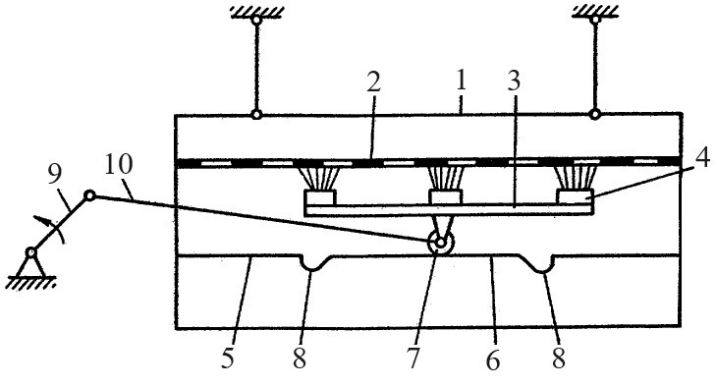
Традиційно вважається, що механізми для очищення отворів решіт від застряглих в них часток відносяться до допоміжних робочих органів зерноочисних машин [1].Зазвичай їх розташовують з боку неробочої поверхні решета (ОВС–25, Р–8–БЦСМ тощо)[1–4]. Очисні пристрої з еластичними очисними елементами можуть бути активними з приводом (ОВС–25 тощо) та без приводу (Р–8–БЦСМ тощо).

Постановка завдання. Метою роботи є пошук вирішення проблеми очистки отворів решіт від застряглих в них часток зернового матеріалу для забезпечення якісних показників роботи зерноочисних машин загального призначення з коливальним рухом решітного стану.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану для визначення їхніх сильних та слабких сторін.

Перевагою очисного пристрою решіт зерноочисної машини ОВС–25 є простота, як конструкції, так і його приводу. Недолік полягає у стиранні чи деформації ворсинок щіткових очисників під час їх роботи внаслідок тертя по поверхні решета. Крім того, конструкцією машини не передбачено можливість зменшення зазору між ними через стирання чи деформацію ворсинок щіток.

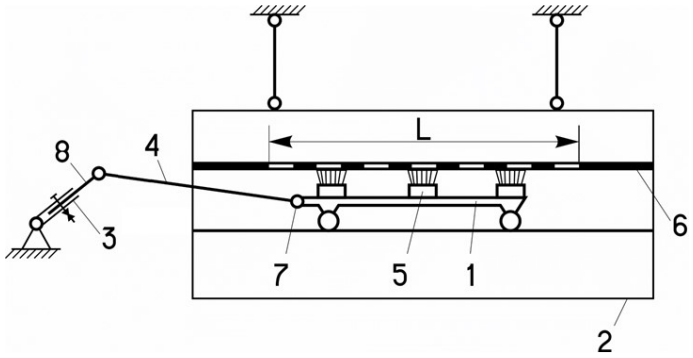
Такі ж недоліки, що і у щіткових очисників зерноочисної машини ОВС–25, характерні конструкціям інших очисних пристроїв(рис. 1–3) [3].



1 – решітний стан; 2– решето; 3 – тримач щіток; 4 – щітка;5 – напрямна планка;
6 – опорна поверхня;7 – ролик; 8 – обмежувач; 9 – кривошип; 10 – шатун

Рисунок 1 – Очисний пристрій

Джерело: розроблено на підставі [3]

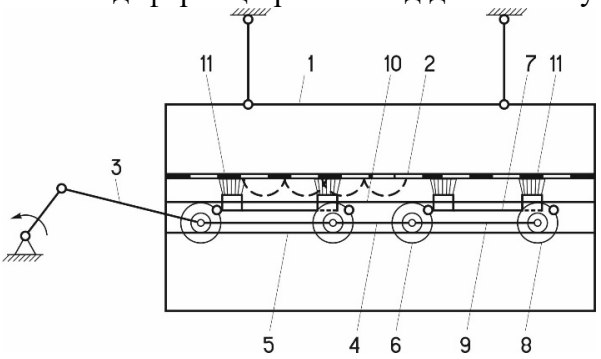


1 – рухома рамка; 2 – решітний стан; 3 – механізм приводу решітного стану; 4 – ведуча ланка;
5 – щітки; 6 – решето; 7 – шарнір; 8 – регулювальна ланка

Рисунок 2 – Очисний пристрій

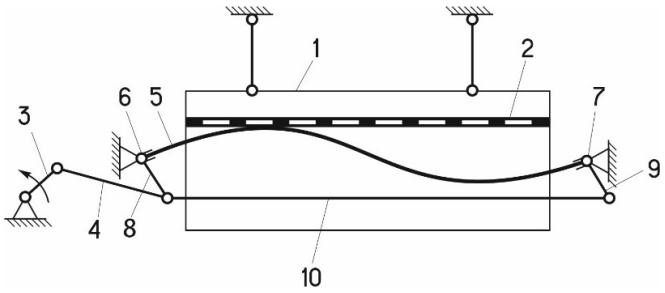
Джерело: розроблено на підставі [3]

Також відомий пристрій для очищення отворів решета від застряглих в ньому часток, в якому в якості очисника отворів виконує пружний лист (рис. 4) [3]. Його переваги полягають у значній зносостійкості пружного листа, заміні сили тертя очисного елемента на тертя коченням. Недолік цієї конструкції полягає у великих внутрішніх знакозмінних напруженнях та деформації решета під дією вигину пружного листа.



1 – решітний стан; 2– решето; 3 – привод; 4 – рамка; 5 – напрямна;6, 8, –колеса;
7,9 – ланки; 10 – опорні доріжки; 11 – щітки
Рисунок 3 – Очисний пристрій

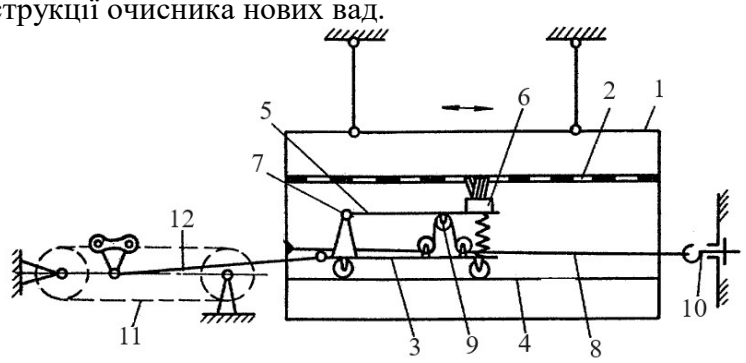
Джерело: розроблено на підставі [3]



1 – решітний стан; 2–решето; 3 – кривошип; 4 – шатун; 5 – пружній лист; 6, 7 – вал;
8, 9 – важіль; 10 – штанга
Рисунок 4 – Очисний пристрій

Джерело: розроблено на підставі [3]

Недоліків щіткових очисників ОВС–25 та очисних пристроїв (рис. 1–3) позбувся очисний пристрій гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану(рис. 5)[3]. Цього вдалося досягти шляхом застосування пружинного механізму підтискання щітки до поверхні решета. Однак, застосування складних механізмів приводу та переміщення щіток надає конструкції очисника нових вад.



1 – решітний стан; 2– решето; 3 – платформа; 4 – напрямна; 5 – важіль; 6 – щітка; 7 – шарнір;
8 – трос; 9 – блочки; 10 – механізм натягу троса; 11 – ланцюгова передача; 12 – тяга
Рисунок 5 – Очисний пристрій

Джерело: розроблено на підставі [3]

Виробник зерноочисних машин Petkus у своїх сепараторах сімейств A, M, U та V застосовує комбіновані очисники отворів решіт від застряглих у них часток зернового матеріалу (рис. 6) [5]. Вони проводять очищення отворів решета одразу з двох сторін. Над поверхнею решета встановлено ланцюгово–скребковий транспортер, який здійснює не тільки очищення отворів від застряглих часток з боку робочої поверхні решета, але забезпечує безперервну рівномірну подачу оброблюваного матеріалу (рис. 7). Це сприяє вирівнюванню просівання прохідних часток крізь поверхню сепарації по всій її довжині.

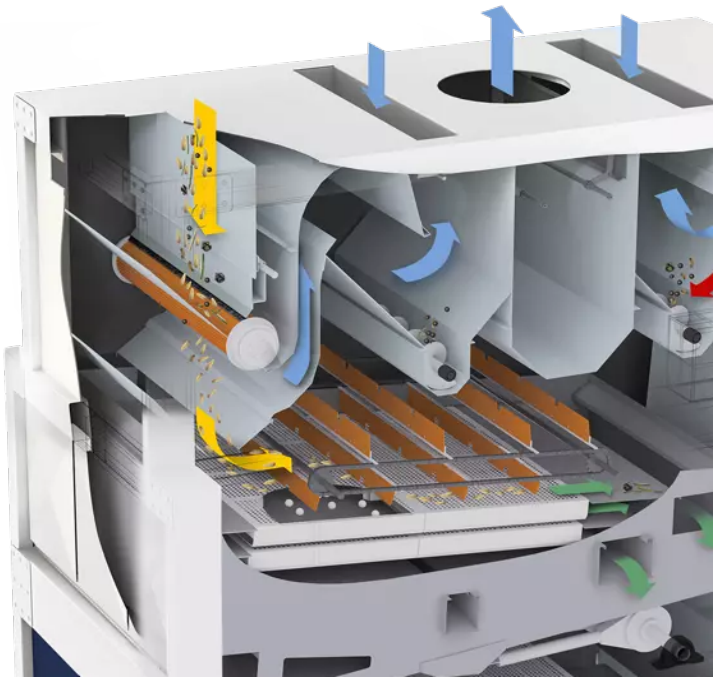


Рисунок 6 – Внутрішня будова та принцип роботи сепараторів Petkus сімейств A, M, U та V
Джерело: розроблено на підставі [5]

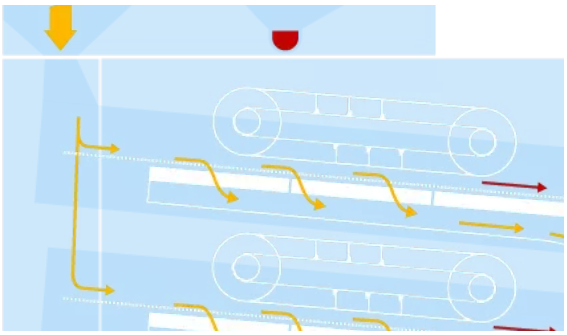


Рисунок 7 – Схема роботи решітних станів сепараторів Petkus сімейств A, M, U та V
Джерело: розроблено на підставі [5]

В якості нижніх очисників отворів решета використовуються гумові м’ячики (рис. 8), котрі під час роботи решітного стану здійснюють хаотичний рух в просторі між нижньою поверхнею решета та дном короба в якому вони знаходяться. Внаслідок коливань решітного стану очисні елементи підстрибують та ударяють по внутрішній поверхні решета. Під час ударів відбувається місцева деформація локальних ділянок решета, верхня поверхня якого підіймається догори. В цей час ширина отворів у верхній їхній площині короткочасно збільшується, що дає можливість застряглим часткам вийти із защемлення бічними гранями отворів.

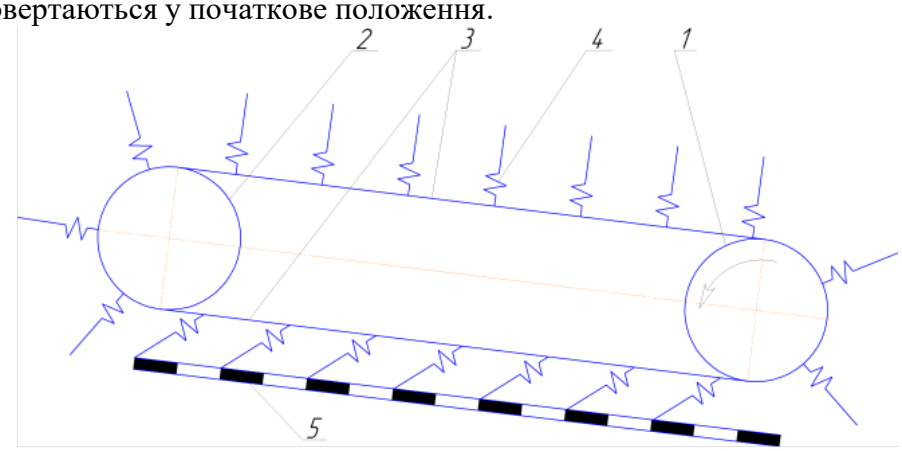


Рисунок 8 – Кулькові очисники решіт сепараторів Petkus сімейств A, M, U та V
Джерело: розроблено на підставі [5]

Таким чином, застосування комбінованих очисників гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану дозволяє не тільки інтенсифікувати процес сепарації за рахунок значного зниження нерівномірності подачі оброблюваного матеріалу по довжині поверхні сепарації, але збільшити час на орієнтацію прохідних часток для проходження крізь отвори та продуктивність зерноочисних машин.

Однією із вад ланцюгово–скребкового транспортера є використання жорсткої пластини в якості шкребка, що може сприяти пошкодженню чи травмуванню застряглих в отворах решета часток. Для запобігання цьому доцільно в якості шкребків використовувати елементи, які у випадку різкого збільшення подачі оброблюваного матеріалу на решето змогли б забезпечити автоматичне регулювання відбирання необхідної кількості матеріалу для подальшого транспортування здовж решета та зменшення травмування застряглих часток під дією транспортуючого елемента.

Для цього доцільно використовувати транспортер, підпружинені планки нижньої гілки якого входять в шар оброблюваного матеріалу і можуть відхилятися від початкового положення в напрямку протилежному до напряму їх руху[6]. Прохідні частки просіваються крізь отвори решета, а непрохідні транспортуються до його кінця. При цьому відбувається очищення отворів від застряглих часток. Під дією пружин скребки повертаються у початкове положення.



1 – приводний барабан; 2–натяжний барабан; 3 – тяговий елемент;
4 – підпружинені планки; 5 – решето;
Рисунок 9 – Очисний пристрій
Джерело: розроблено на підставі [6]

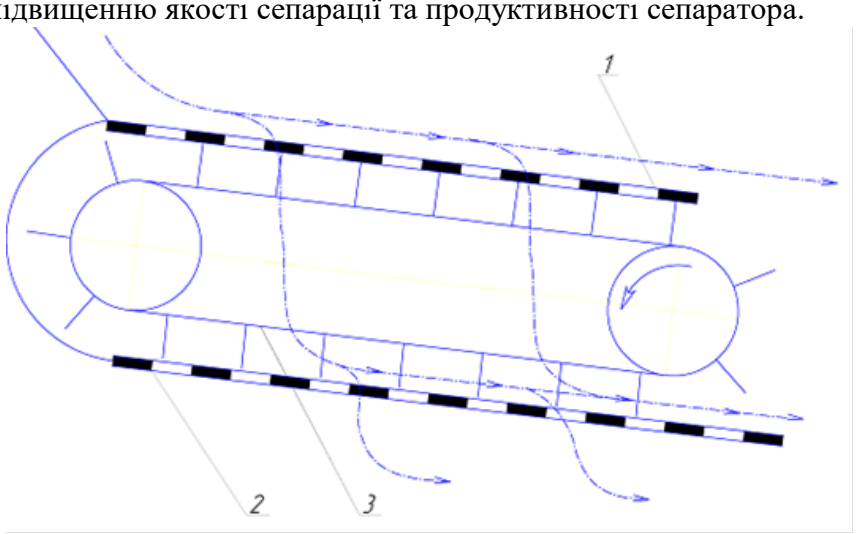
Це дозволяє вирішити задачу одночасного транспортування оброблюваного матеріалу по решету та очищення його отворів від непрохідних часток.

Ідею закладену Petkusв конструкції сепараторів сімейств А, М, U та V доцільно використати для виштовхування застряглих непрохідних з отворів верхнього колосового решета з боку його нижньої неробочої поверхні з одночасним транспортування часток, що просіялися по нижньому підсівному решеті (рис. 10) [7]. Це дозволяє збільшити час, необхідний часткам для зайняття зручного положення для попадання та проходження крізь отвори решета.

Недоліками цієї конструкції є нерівномірність розподілу зернового матеріалу по довжині нижнього підсівного решета та відсутність можливості усувати зазор між шкребками та поверхнями решіт, який виникає внаслідок зношування від тертя перших по поверхнях других.

Щоб усунути нерівномірність розподілу зернового матеріалу по довжині нижнього підсівного решета в наступному пристрої замінено ланцюгово–скребковий транспортер на полотняно–планчастий з високими планками (рис. 11) [8].

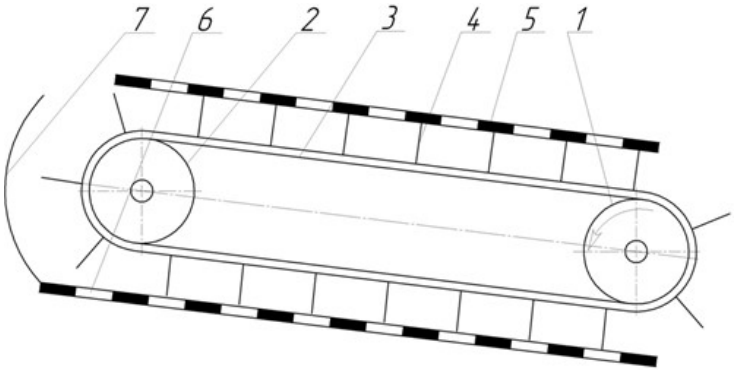
Ця конструкція очисника–транспортера дозволяє вирішити задачу одночасного транспортування та очищення отворів решета від непрохідних часток, більш рівномірного розподілу зерна по ширині нижнього решета, збільшення часу контакту часток з поверхнею сепарації, зменшенню товщини шару матеріалу, що знаходиться на ній, сприяє підвищенню якості сепарації та продуктивності сепаратора.



1 – верхнє колосове решето; 2–нижнє підсівне решето; 3 – ланцюгово–скребковий транспортер

Рисунок 10 – Транспортер–очисник

Джерело: розроблено на підставі [8]



1 – приводний барабан; 2–натяжний барабан; 3 – тяговий елемент; 4 – підпружинені планки; 5 –верхнє решето; 6 – нижнє решето; 7 – кожух

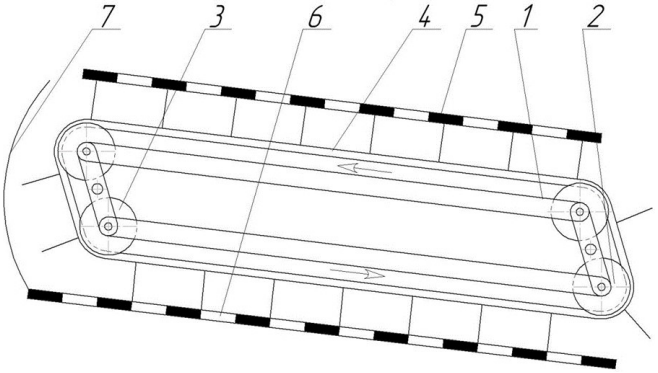
Рисунок 11 – Очисник–транспортер

Джерело: розроблено на підставі [7]

Однак конструкція очисника–транспортера не усуває недолік з регулювання зазору, що виникає внаслідок зношування планок від їх тертя по поверхнях решіт.

Цей недолік усуває конструкція транспортера–очисника–дозатора(рис. 12)[9]. Його паралелограмний механізм дозволяє усувати зазор, що виникає внаслідок зношування зовнішньої поверхні планок, шляхом переміщення в протилежні напрямки верхніх та нижніх опор з подальшою фіксацією їхнього положення.

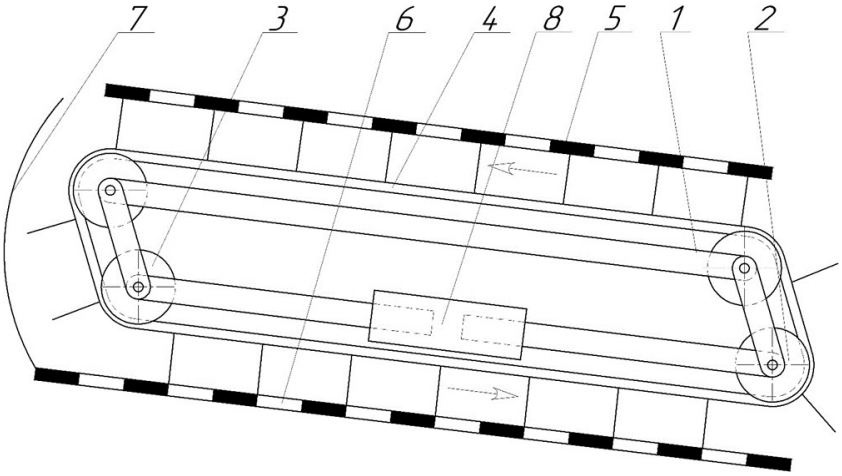
Застосування в транспортері–очиснику замість паралелограмного механізму чотирьох-ланкового з можливістю регулювання довжини нижньої ланки дозволяє скоротити час на проведення регулювань в пристрої та збільшити технологічний час роботи сепаратора, що сприяє підвищенню продуктивності зерноочисної машини (рис. 13) [10].



1 – рама; 2–приводний барабан; 3 – натяжний барабан; 4 – полотняно–планчастий транспортер; 5 – верхнє решето; 6 – нижнє решето; 7 – кожух

Рисунок 12 – Транспортер-очисник-дозатор

Джерело: розроблено на підставі [9]



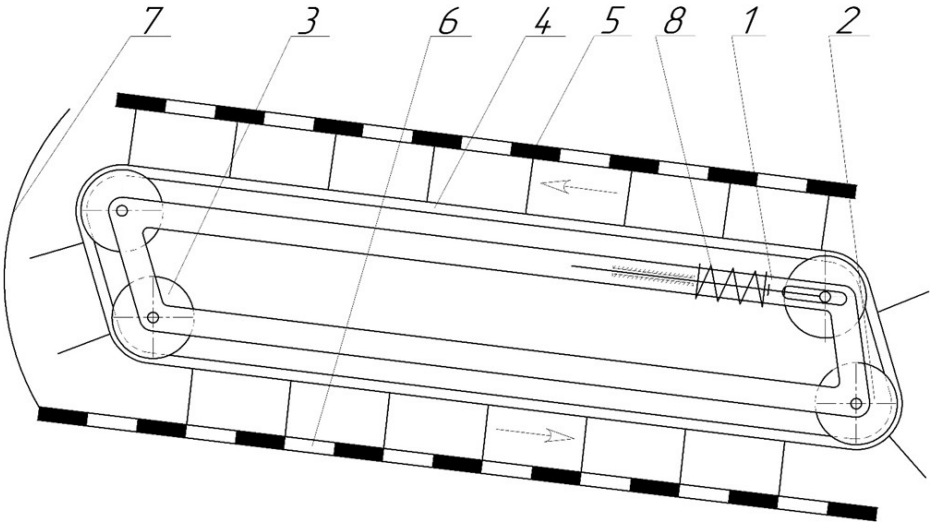
1 – рама; 2– приводний барабан; 3 – натяжний барабан; 4 – полотняно–планчастий транспортер; 5 – верхнє решето; 6 – нижнє решето; 7 – кожух; 8 – механізм регулювання довжини нижньої ланки

Рисунок 13 – Транспортер-очисник

Джерело: розроблено на підставі [10]

Ще більше скорочує час на проведення регулювань наступна конструкція транспортера–очисника, в якій механізм регулювання довжини нижньої ланки замінили пружинним механізмом (рис. 14) [11]. Вона дозволяє не тільки вирішити задачу одночасного транспортування та очищення отворів решета від непрохідних часток, а й підвищити рівномірність розподілу зерна по ширині нижнього решета, збільшити час контакту часток з поверхнею сепарації. Це сприяє зменшенню товщини шару

матеріалу, що знаходиться на ній, підвищенню якості сепарації та продуктивності сепаратора, а також дозволяє автоматично змінювати налаштування ланок для усунення зазору між ними та поверхнями решіт.



1 – рама; 2– приводний барабан; 3 – натяжний барабан; 4 – полотняно–планчастий транспортер; 5 – верхнє решето; 6 – нижнє решето; 7 – кожух; 8 – пружинний механізм

Рисунок 14 – Очисний пристрій

Джерело: розроблено на підставі [11]

Встановлено, що застосування різних видів транспортерів забезпечує одночасно транспортування та очищення отворів решета від непрохідних часток, більш рівномірний розподіл зерна по ширині та довжині решіт, збільшує час контакту часток з поверхнею сепарації. Це сприяє зменшенню товщини шару матеріалу, що знаходиться на ній, підвищенню якості сепарації та продуктивності сепаратора, а також автоматично змінювати налаштування ланок для усунення зазору між ними та поверхнями решіт.

Тому доцільно в конструкції решітного стану з коливальним рухом над верхнім решетом та під нижнім встановлювати ланцюгово–скребкові транспортери, а між ними дляочищення отворів решета від непрохідних часток, більш рівномірного розподілу зерна по ширині та довжині нижнього решета, збільшення часу контакту часток з його поверхнею слід встановлювати полотняно–планчастий транспортер, змонтований на чотирьох ланковій рамі з встановленим на ній механізмом автоматичного регулювання положень планок транспортера відносно поверхонь решіт.

Висновки. Проведений аналіз конструкцій зерноочисних машин з коливальним рухом решітних станів дозволив встановити переваги та недоліки різних конструкцій механізмів для очищення отворів решіт від застряглих в них часток.

Не дивлячись на широке використання для очищення решіт щіток, вони мають найбільше недоліків. До основних вад щіткових очисних механізмів відносяться:

– стирання та деформація щетинок внаслідок тертя по поверхні решіт;

– конструкціями не передбачено спосіб усунення зазору, що виникає внаслідок тертя щіток по поверхні решіт;

– незадовільна якість очищення отворів від застряглих часток через стирання чи деформацію щетинок;

– нерівномірне зношення та деформація щетинок між щітками по довжині решета;

– щітки зі зношеними чи деформованими щетинками необхідно замінювати.

Порівняно з ними скребкові та планчасті транспортери мають переваги:

– рівномірне зношення між скребками чи пластинками по довжині транспортера;
– в рази більший строк експлуатації;
– зменшення шару матеріалу на поверхні решета;
– забезпечення рівномірності просівання часток по довжині решета;
– вища ефективність та продуктивність роботи решета.

Список літератури

1. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. К.: Урожай, 1990. 184 с.
2. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора / В.М. Сало та ін. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
3. Завгородній О.І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин: автореф. дис. на здобуття ступеня д–ра техн. наук: спец. 05.05.11 , Харків, 2001. 20 с.
4. Мороз С.М., Васильковський М. І., Васильковський О.М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровогр. нац. техн. ун-ту. 2004. Вип. 14. С. 72-78.
5. Сепаратори Petkus: веб-сайт. URL: https://www.petkus.de/produkte/sortieren/reiniger/vorreinigung (дата звернення: 02.11.2023).
6. Транспортер-очисник: пат. 65162 С2 Україна: МПК B65G 47/14. № u201106289; заявл. 19.05.11; опубл. 25.11.2011. Бюл. № 22.
7. Сепаратор зерна: пат. 101096 Україна: МПК A01F 12/44, B65G 47/14. № u201502182; заявл. 12.03.15; опубл. 25.08.2015. Бюл. №16.
8. Сепаратор зерна: пат. 105640 Україна: МПК B07B 4/00. № u201510172;з аявл. 19.10.15; опубл. 25.03.2016. Бюл. №16.
9. Очисний пристрій: пат. 111459 Україна: МПК A01F 12/44, B65G 47/14, B07B 1/00. № u201604987; заявл. 04.05.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 21.
10. Очисний пристрій: пат. 125770 Україна: МПК A01F 12/44, B65G 47/14, B07B 1/00. № u201712457; заявл. 15.12.2017; опубл. 25.05.2018. Бюл. № 10.
11. Очисний пристрій: пат. 125840 Україна: МПК A01F 12/44, B65G 47/14. № u201712812; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.05.2018. Бюл. № 10.

References

1. Komarystov, V.Iu. & Petrenko, M.M. (1990). *Dovidnyk z mekhanizatsii pisliazbyralnoi obrobky zerna* [*Handbook of mechanization of post-harvest processing of grain*]. Kyiv: Urozhai. [in Ukrainian].
2. Salo V.M., Moroz, S.M., Vasylkovskyi, O.M., Leshchenko, S.M. & Petrenko, D.I. (2014). *Rozrobka novoi konstruktsii pnevmoreshitnoi zernoochysnoi mashyny. Vol 1. Obgruntuvannia parametriv transportera-separatora* [*Development of a new design of a pneumatic sieve grain cleaning machine. Volume 1. Justification of conveyor-separator parameters*]. Kirovohrad: SPD FO Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Zavhorodnii, O.I. (2001). Naukovi osnovy protsesiv ochyshchennia otvoriv reshit zernoochysnykh mashyn [Scientific basis of the processes of cleaning the holes of the sieves of grain cleaning machines]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Moroz, S.M., Vasylkovskyi, M.I. & Vasylkovskyi, O.M. (2004). Obgruntuvannia diametriv sterzhniv prutkovoho resheta [Determination of the diameters of the rods of the bar sieve]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia* : *zb. nauk. prats TNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation :Collected Works of KNTU, Issue. 14,* 72–78 [in Ukrainian].
5. Separatory Petkus [Petkus separators]: veb-sayt. *petkus.de.* Retrieved from https://www.petkus.de/produkte/sortieren/ reiniger/vorreinigung [in Ukrainian].
6. Transporter-ochysnyk [Conveyor-cleaner]: pat. 65162 S2 Ukrayina; MPK B65G 47/14. № u201106289; zayavl. 19.05.11; opubl. 25.11.2011. Byul. № 22.

7. Separator zerna [Grain separator]: pat. 101096 Ukrayina; MPK A01F 12/44, B65G 47/14. № u201502182; zayavl. 12.03.15; opubl. 25.08.2015. Byul. №16.
8. Separator zerna [Grain separator]: pat. 105640 Ukrayina; MPK V07V 4/00. № u201510172; zayavl. 19.10.15; opubl. 25.03.2016. Byul. №16.
9. Ochysnyy prystriy [Cleaning device]: pat. 111459 Ukrayina; MPK A01F 12/44, B65G 47/14, B07B 1/00. № u201604987; zayavl. 04.05.2016; opubl. 10.11.2016. Byul. № 21.
10. Ochysnyy prystriy [Cleaning device]: pat. 125770 Ukrayina; MPK A01F 12/44, B65G 47/14, B07B 1/00. № u201712457; zayavl. 15.12.2017; opubl. 25.05.2018. Byul. № 10.
11. Ochysnyy prystriy [Cleaning device]: pat. 125840 Ukrayina; MPK A01F 12/44, B65G 47/14. № u201712812; zayavl. 22.12.2017; opubl. 25.05.2018. Byul. № 10.

Oleksii Zadorozhnii, post-graduate**, Serhii Moroz,** Assoc. Prof., PhDtech. sci., **Oleksii Vasylkovskyi**, Prof., PhDtech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Designs the Cleaning Devices of Gravity Sieves With Oscillating Movement of the Sievestate of General-Purpose Graincleaning Machines

The purpose of the article is to identify the most effective methods and means of cleaning the openings of the sieves of grain cleaning machines from clogging. The article analyzes the designs of cleaning devices that are equipped with gravitational oscillating sieves of modern general-purpose grain cleaning machines to ensure quality indicators of work and increase the productivity of separators.

The analysis of existing designs showed that in the vast majority of machine designs, cleaning devices are installed under the grates. Only some machines use combined cleaners that work on both sides of the screen. Oscillating mechanisms are used as one-sided cleaning devices, the main working organ of which is a brush. Such devices are installed under the grate. Depending on the design, they are brush or impact with elastic elements - in the form of various shaped devices that are located and move randomly in special boxes. Combined cleaning devices are installed between the sieves. These are mostly brush scraper conveyors. It was established that the most rational would be the use of a combined cleaning device of continuous action, which allows not only to clean the holes of the sieves from the particles stuck in them, but, at the same time, to carry out the transportation of particles of grain material along the working surface of the sieves along its holes.

The analysis of designs of grain cleaning machines with oscillating movement of sieves made it possible to establish the advantages and disadvantages of various designs of mechanisms for cleaning sieve openings from particles stuck in them. In particular, it was found that brush oscillating cleaning mechanisms suffer the most from abrasion and deformation of the bristles, while constructively there are no ways to eliminate the gaps that arise as a result of wear. Compared to them, continuous scraper conveyors have advantages, among which uniform wear between the scrapers along the length of the conveyor and, as a result, a longer service life, as well as the creation of conditions for increasing the efficiency of grain separation, are distinguished.

graincleaningmachinesofgeneralpurpose, sieve, sievecleaner

Одержано (Received) 10.12.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 19.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.363.28:631.333.92 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.247-255

С. П. Степаненко, д-р. техн. наук., ст. наук. співр., **С.П. Тримбач**
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, Глеваха, Україна
e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання процесу утворення гранул із сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею

На основі механізму та кінетичних закономірностей утворення гранул із сипких матеріалів розроблена математична модель процесу, який відбувається в грануляторах з кільцевою матрицею. Проведені дослідження показали, що процес грануляції сипких матеріалів є стохастичним, оскільки результуючий гранулометричний склад є полідисперсним, і це пояснюється нерівномірним процесом гранулювання, що залежить від фізико-механічних властивостей зв'язуючого матеріалу, безпосередньо від частинок сипкого матеріалу, а також від таких явищ, як коагуляція та руйнування, знос та деформація.

Під час вивчення механізму утворення гранул з сипкого матеріалу було встановлено, що накладення шарів на поверхні циліндричної гранули відбувається по спіральній кривій. У всіх випадках впливу геометрії та динаміки обертового руху кільцевої матриці форма гранули наближається до циліндра, за винятком сильно деформованих гранул. Була розроблена математична модель, яка загалом відображає динаміку асиметричного зростання гранули внаслідок її ущільнення та деформації. Отримані рівняння описують процес формування гранул з сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею.

грануляція, механізм утворення гранул, фізико-механічні властивості, кінетичні закономірності, математична модель

Постановка проблеми. Процес гранулювання сипких матеріалів в матричних грануляторах є досить складним і залежить від багатьох факторів, які впливають на якість виконання даної операції. Процес гранулювання сипких матеріалів можна здійснювати декількома основними робочими органами, які можна поділити на вальцеві; шнекові; штемпельні; матричні [1-5].

Слід зауважити, що на даний час відсутнє моделювання процесу утворення гранул із сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею для визначення значення кутової швидкості і лінійної швидкості руху частинок матеріалу при їх переміщенні в просторі між роликом та матрицею, тому визначення даної взаємозалежності є актуальним завданням для подальшого конструювання грануляторів з кільцевою матрицею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою розроблення математичної моделі фізичного процесу утворення гранул з сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею з урахуванням анізотропії структури і деформації сипкого матеріалу проведено послідовні теоретичні та експериментальні дослідження.

Відомо, що потреба у гранулюванні сипких матеріалів та вимоги до їх якості призвели до створення різних видів технічних засобів і обладнання, таких як гранулятори з плоскою матрицею, з кільцевою матрицею, шнекові з високими зовнішніми напруженнями, обертові апарати та інші [1, 2].

Достатня кількість, як вітчизняних так і закордонних вчених [5] проводили експериментальні дослідження процесів гранулювання сипкого матеріалу у пристроях

© С.П. Степаненко, С.П. Тримбач, 2023

для перемішування з подальшим гранулюванням матеріалу [3-7], і у грануляторах з кільцевою [3-7] та плоскою матрицею [8-12]. Вони показали, що кінцевий розмір гранул визначається багатьма параметрами, серед яких важливо відзначити розмір утвореної гранули, розміри частинок сипкого матеріалу, який подається в гранулятор та фізико-механічних властивостей сипкого середовища, властивості рідини, яка подається для зв'язування (структурованості) гранул та методи гранулювання. У роботах [13-15] розглядається вплив розмірів часток в'язучої рідини на утворення та подальший вихід гранул та на морфологію структури. Варто відзначити, що прогнозування необхідної кількості в'язучої рідини, тобто відповідного розміру крапель для отримання бажаного розміру гранули є досить складним завданням, оскільки, окрім зазначених факторів, розміри утворених гранул залежать від адгезійних властивостей сипкого матеріалу та фізичних властивостей рідини (в'язкість, поверхневий натяг). Деформація та умови ущільнення гранули визначаються вологозберігаючою здатністю поверхні гранул. У зв'язку з цим у роботах [11, 16] досліджено вплив розмірів часток сипкого матеріалу на швидкість утворення гранул у грануляторах з плоскою матрицею. Вводиться поняття часу проникнення в'язучої рідини в шар сипкого матеріалу, так званого часу пенетрації, який визначається як [16]:

$$t_{П} = 1{,}4 \cdot \frac{V_0^{0,7} \cdot \eta_P}{\varepsilon^2 \cdot R_{П} \sigma_P \cdot \cos(\theta)}, \qquad (1)$$

де V_0 - об'єм краплини рідини;

$R_{П}$ - радіус утворених порожнин в сипкому середовищі (пор);

ε – пористість матеріалу;

η_F – в'язкість рідини;

θ – кут змочування сипкого матеріалу;

σ_P – поверхневий натяг рідини.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка математичної моделі, яка б в загальному вигляді відображала динаміку асиметричного зростання гранули внаслідок її ущільнення та деформації.

Виклад основного матеріалу. Слід відмітити, що однією з ключових проблем в промислових процесах гранулювання сипких матеріалів є визначення функції розподілу гранул за розмірами, що дозволяє визначити зміну їх середнього розміру за довжиною кола кільцевої матриці [6, 16, 17].

Для створення та аналізу складної моделі утворення гранул та їх ущільнення під час обертання кільцевої матриці з урахуванням анізотропії структури сформованих гранул було проведено ряд теоретичних досліджень.

Проведені дослідження [10, 16] вказують на те, що експериментальні криві розподілу гранул за розмірами в комбінованих грануляторах показують пік на кривій розподілу, максимум яких визначається в області структурного формування гранули. У грануляторах з кільцевою матрицею найбільш ефективним є математичний опис функції розподілу розмірів гранул за допомогою стохастичного диференціального рівняння Фоккера-Планка [17-19] на основі експериментальних даних, які описують неперервність процесу гранулювання та вихід гранул.

Як відомо [5, 8, 20], процес гранулювання супроводжуються ущільненням, деформацією та виходом гранул з філь'єри кільцевої матриці, що призводить до зміни їх фракційного складу (розміру), фізичних властивостей, таких як густина, міцність та пористість [10, 20]. Так в роботі [14] зміна густини гранули від часу і характеристик гранулятора представлена такою залежністю:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 10^{-4} \cdot \left[\frac{D}{l}\right]^{-2} \cdot \omega^{0,1} \cdot k^{-1}, \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість обертання кільцевої матриці;

D, l –діаметр і ширина матриці;

k – емпіричний коефіцієнт.

Достатня кількість емпіричних формул для розрахунку фізичних властивостей гранул наведено в роботах [6, 12, 14]. Важливо відзначити, що густина гранул визначається як $\rho = \rho_{сп} \cdot [1 - \varepsilon(t)]$, де $\rho_{сп}$ - густина сипкого матеріалу; $\varepsilon(t)$ - пористість гранули, яка залежить від часу і реології матеріалу, ущільнення та деформації. Отже, зміна густини пов'язана зі зміною пористості гранули з плином часу.

Загалом процес грануляції, на перший погляд, здається досить простим, але є дуже складним явищем, яке включає дослідження і опис таких явищ, як формування гранули, реологія ущільнення, деформація та інше.

З метою створення і аналізу математичної моделі утворення гранули та її ущільнення під час обертання матриці з урахуванням анізотропії структури утворених гранул було проведено низку теоретичних та експериментальних досліджень.

Встановлено [1, 8, 18, 19], що механізм грануляції сипких матеріалів методом обертання кільцевої матриці з двороликовою системою визначається такими етапами: а) змішування сипкого матеріалу з краплями «зв'язучої» рідини та утворення деякої однорідної структури матеріалу; б) формування безпосередньо гранул в процесі грануляції, що визначається характером внутрішньо шарової взаємодії в середовищі часток матеріалу.

Геодинаміка процесу полягає у ротаційному русі матеріалу по поверхні матриці, завдяки чому геометрія руху наближається до симетрії обертального шару або сфери. Іншими словами, вона складається з нескінченної кількості вісей симетрії нескінченного порядку. У такій геометрії динаміка процесу сама по собі призводить до того, що сипкий матеріал в перерізі між роликом та матрицею набуває деякої форми: овал, еліпс, сама гранула циліндричної форми (рис.1). З іншого боку, геометрія анізотропії структури матеріалу визначається тертям, деформацією у всіх напрямках, що створює умови для викривлення та зміщення осей симетрії. Однак у всіх випадках впливу геометрії обертального руху та анізотропії структури форма матеріалу наближається до «круглої», за винятком сильно деформованого матеріалу та відповідного отримання гранул.



Рисунок 1 - Вихід циліндричної гранули з кільцевої матриці
Джерело: розроблено авторами

Залежність форми гранули від часу та умов її формування описується у сферичних координатах (R, θ, ψ), через площу поверхні гранул, наступним рівнянням:

$$S = \iint \sqrt{1 + R^{-2} \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial \theta}\right)^2 + (R \cdot \sin[\theta])^{-2} \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial \psi}\right)^2} \cdot (R^2 \cdot \sin[\theta]) d\theta d\psi, \quad (3)$$

де $0 \le \theta \le \pi$, $0 \le \psi \le \pi$ - полярні кути.

Якщо припустити, що δ величина товщини матеріалу, який нагромаджується перед філь'єрою матриці для подальшого його ущільнення то можна записати $\delta = R + \delta(\theta, \psi)$.

З урахуванням умови, що $\delta \ll R$, площу поверхні гранули, враховуючи (2), можна представити так:

$$S = \iint \left[1 + 0{,}5 \cdot (R + \delta)^{-2} \cdot \left(\frac{\partial \delta}{\partial \theta}\right)^2 + 0{,}5 \cdot \left((R + \delta) \cdot \sin[\theta]\right)^{-2} \cdot \left(\frac{\partial \delta}{\partial \psi}\right)^2\right] \cdot \cdot ((R + \delta)^2 \cdot \sin[\theta]) d\theta d\psi, \quad (4)$$

При зміні товщини δ на деяку величину $\Delta\delta$, площа поверхні гранули змінюється на величину:

$$\Delta S = \iint \left[2 \cdot (R + \delta) \cdot \Delta\delta + \left(\frac{\partial \delta}{\partial \theta}\right)\left(\frac{\partial \Delta\delta}{\partial \theta}\right) + (\sin[\theta])^{-2} \cdot \left(\frac{\partial \delta}{\partial \psi}\right)\left(\frac{\partial \Delta\delta}{\partial \psi}\right)\right] \cdot (\sin[\theta]) d\theta d\psi, \quad (5)$$

Вираз (5) можна розглядати як зміну площі поверхні гранули при зміні товщини δ. Інтегруючи два останні члени (5) від 0 до π, маємо:

$$\int \left(\frac{\partial \delta}{\partial \theta}\right)\left(\frac{\partial \Delta\delta}{\partial \theta}\right) \cdot (\sin[\theta]) d\theta = -\int \Delta\delta \cdot \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin[\theta] \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \theta}\right) d\theta, \quad (6)$$

$$\int \left(\frac{\partial \delta}{\partial \psi}\right)\left(\frac{\partial \Delta\delta}{\partial \theta}\right) \partial\psi = -\int \Delta\delta \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial \psi^2} \partial\psi, \quad (7)$$

З урахуванням цих виразів і припускаючи, що зміна площі поверхні внаслідок нагромадження матеріалу за шириною Δl дорівнює $\iint \delta\Delta l(\sin[\theta]) d\theta d\psi$, вираз (5) можна представити наступним чином:

$$\Delta S = \iint \left(\left[2 \cdot (R + \delta) - (\sin[\theta])^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin[\theta] \frac{\partial \delta}{\partial \theta}\right) - (\sin[\theta])^{-2} \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial \psi^2}\right] \cdot \Delta\delta \cdot \sin[\theta] + + \sin[\theta]\, \delta\Delta l\right) d\theta d\psi \quad (8)$$

Дана залежність описує зміну площі поверхні гранули під час зміни товщини шару сипкого матеріалу.

Зміна об'єму гранули визначається як:

$$\Delta V = \iint \Delta\delta \cdot (R + \delta)^2 \sin[\theta]\, d\theta d\psi, \quad (9)$$

Поділімо підінтегральний вираз (8) на (9), враховуючи той факт, що δ значно менше за R. Це дозволить нам отримати вираз під інтегралом, який

описує, як змінюється площа поверхні гранули відносно зміни її об'єму. Перейшовши до граничного випадку, ми отримаємо наступний вираз:

$$\frac{dS}{dV} = 2 \cdot R^{-1} - R^{-2} \cdot (\sin[\theta])^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin[\theta]\frac{\partial\delta}{\partial\theta}\right) - (R \cdot \sin[\theta])^{-2} \cdot \frac{\partial^2\delta}{\partial\psi^2} + \delta \cdot \frac{\partial l}{\partial t}, \quad (10)$$

Після множення та ділення обох частин на Δt та позначення $\frac{dV}{dt}$ як φ та $\frac{\partial l}{\partial t}$ як V, ми можемо переписати рівняння (10) наступним чином:

$$\frac{dS}{dt} = \varphi \cdot \left[2 \cdot R^{-1} - R^{-2} \cdot (\sin[\theta])^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin[\theta]\frac{\partial\delta}{\partial\theta}\right) - (R \cdot \sin[\theta])^{-2} \cdot \frac{\partial^2\delta}{\partial\psi^2}\right] + \delta \cdot V \quad ,(11)$$

де V – швидкість руху гранули.

Величина V вказує на швидкість руху гранули, і це впливає на спосіб, яким змінюється її форма та розмір з часом. Таким чином, у рівнянні (10) перший член описує, як гранула змінює свою форму, враховуючи її геометричні особливості, тоді як другий член пояснює, як гранула рухається і змінюється у процесі. Загалом, рівняння (10) відображає динаміку зміни гранули, яка може бути нерегулярною через нерівномірність подачі матеріалу. Однак для симетричної гранули (циліндр) з радіусом r ($S = 2\pi r(H + r)$), H – висота зрізаної частини циліндричної гранули, ми отримуємо більш просте рівняння, що пояснює, як змінюється її середній розмір у філь'єрі матриці.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\varphi}{\pi \cdot r \cdot (H+r)} + \frac{\delta \cdot V}{\pi \cdot H + 2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (12)$$

Важливо відзначити, що гранула у формі циліндра має однакову будову у всіх напрямках і не змінює свою міцність та інші характеристики. Загальне рішення рівняння (12) складається з складних математичних виразів, тому розглянемо окремі сценарії його вирішення:

1. Якщо значення r набагато менше за $\frac{\varphi \cdot (H+2 \cdot r)}{r \cdot (H+r) \cdot \delta \cdot V}$, то рівняння (12) може бути наведено в наступному вигляді:

$$r \cdot (H + r) \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{2 \cdot \varphi(t)}{\pi}, \quad (13)$$

З початковою умовою: $r(t)_{t=0} = r_0$, рішення (13) набуде наступного вигляду:

$$r(t) = \left[r_0^3 + \frac{6}{\pi}\int_0^t \varphi(t)dt\right]^{\frac{1}{3}}, \quad (14)$$

2. Якщо значення r більше за $\frac{\varphi \cdot (H+2 \cdot r)}{r \cdot (H+r) \cdot \delta \cdot V}$, то рівняння (12) може бути наведено в наступному вигляді:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\delta \cdot V}{\pi \cdot [H + 2 \cdot r]}, \quad (15)$$

рішення (15) набуде наступного вигляду:

$$r(t) = \left[r_0^2 + \frac{\delta \cdot V}{\pi} t\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

Формула (15) аналогічна рівнянню для процесу гранулювання в грануляторі з кільцевою матрицею, яке було описано у дослідженні [18], як відомо $V = \omega \cdot R_M$, де ω - кутова швидкості обертання та R_M радіус кільцевої матриці. На основі

розв'язків (14) і (16) процес утворення гранул можна поділити на дві стадії: від 0 до $t_П$, коли формується структура гранули, і коли час більше за $t_П$, тобто коли гранула збільшується завдяки пресуванню матеріалу на її торцеву поверхню. Відповідно, $t_П$ може бути визначено часом релаксації утворення гранули. Використовуючи рівняння (1) і вважаючи, що об'єм краплі рінини, що подається в процесі гранулювання для зв'язування сипкого матеріалу дорівнює $V_к = \pi \cdot d_k^3/6$, ми отримуємо:

$$t_П = 0{,}9 \cdot \frac{d_k^2 \cdot \eta_P}{\varepsilon^2 \cdot R_П \cdot \sigma_P \cdot \cos(\theta)}, \quad (17)$$

Рівняння (17) насправді відповідає умові та часу заповнення утворених «капілярних» пор у впорядкованих структурах. З нього випливає, що зі збільшенням середнього діаметра крапель рідини час утворення гранул значно збільшується, і це зростання пропорційне квадрату діаметра.

3. Перейдемо до розгляду стаціонарного варіанту рівняння (11) при $t > t_П$:

$$\varphi \cdot R^{-2} \cdot \left[(\sin[\theta])^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin[\theta]\frac{\partial\delta}{\partial\theta}\right) + (\sin[\theta])^{-2}\frac{\partial^2\delta}{\partial\psi^2}\right] = \delta \cdot V \quad (18)$$

Припустимо, що товщина накладених шарів у філь'єрі матриці залишається незмінною відносно полярного кута ψ, то рівняння (18) можна переписати наступним чином:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin[\theta]\frac{\partial\delta}{\partial\theta}\right) = \frac{\delta \cdot V \cdot R^2 \cdot \sin[\theta]}{\varphi} \quad (19)$$

Оскільки друга похідна $\left(\frac{\partial^2\delta}{\partial\theta^2}\right)$ незначна, це рівняння можна переписати у такому вигляді:

$$cos[\theta]\frac{\partial\delta}{\partial\theta} = \frac{\delta \cdot V \cdot R^2 \cdot \sin[\theta]}{\varphi} \quad (20)$$

Розділимо обидві частини на θ та проінтегруємо їх, і отримаємо вираз:

$$Ci[\theta] = \xi \cdot Si[\theta] \quad (21)$$

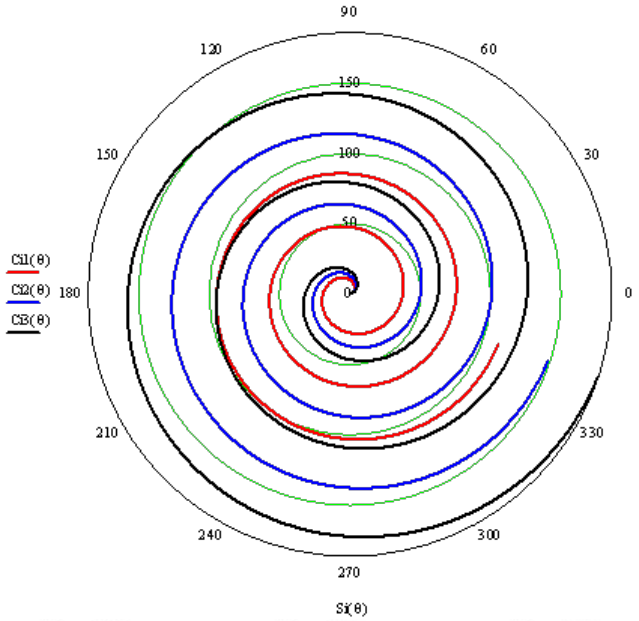
де $Ci[\theta]$, $Si[\theta]$ - інтегральні косинус та синус.

Значення ξ визначається виразом $\xi = \frac{V \cdot R^2}{\varphi \cdot \partial ln\delta/\partial\theta}$, де θ - це кут в радіанах.

Дане рівняння (21) відображає процес стаціонарного накладення шарів сипкого матеріалу над філь'єрою матриці у процесі гранулювання. На рис. 2 показані числові траєкторії накладення шарів сипкого матеріалу над філь'єрою матриці у процесі гранулювання при різних значеннях параметра ξ.

З рис. 2а, де $\xi = 0{,}5$, видно, що накладення шарів зосереджується більше в одному місці на поверхні гранули, тобто накладення менш рівномірне. З рис. 2б, де $\xi = 1{,}0$, накладення більш рівномірне, розподілене по всій торцевій поверхні гранули.

Встановлена геометрична інтерпретація допомагає розуміти, як параметр ξ впливає на процес гранулювання матеріалу. Більше значення ξ призводить до більш рівномірного процесу гранулювання матеріалу, в той час як менше значення ξ викликає нерівномірність процесу. Представлені графіки надають візуальне уявлення про процес гранулювання.



3¶ 2¶ 1¶

1 - $\xi = 0{,}6$; 2 - $\xi = 0{,}8$; 3 - $\xi = 1{,}0$;

Рисунок 2 – Представлено геометрична інтерпретація моделі накладення шарів сипкого матеріалу над філь'єрою матриці на торцеву поверхню гранули для різних значень параметра ξ

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Під час вивчення механізму утворення гранул з сипкого матеріалу було встановлено, що накладення шарів на поверхні циліндричної гранули відбувається по спіральній траєкторії. У всіх випадках впливу геометрії та динаміки обертового руху кільцевої матриці форма гранули наближається до циліндра, за винятком сильно деформованих гранул.

Була розроблена математична модель (рівняння 11), яка загалом відображає динаміку асиметричного зростання гранули внаслідок її ущільнення та деформації. Отримані рівняння описують процес формування гранул з сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею та включають три значущі аспекти.

Список літератури

1. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль, 2001. 975 с.
2. Братішко В. В. Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбікормів гвинтовими грануляторами : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.05.11. Глеваха, 2017. 43 с.
3. Братішко В. В. Узгодження конструкційних параметрів матриць гвинтових грануляторів кормів за тиском та пропускною здатністю. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. № 27. С. 187–191.
4. Boltyanska N. Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. TEKA. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 23–29.
5. Болтянська Н. І. Шляхи вдосконалення конструкцій шестеренних прес-грануляторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. № 10(109). С. 104–110.
6. Болтянська Н. І., Комар А. С. Обґрунтування шляхів вдосконалення процесу гранулювання у прес-грануляторах з кільцевою матрицею. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. № 199. С. 176–186.
7. Pelleting Handbook. Sarpsborg, Borregaard Lignotech / J. Payne et al. 2001. 73 p.
8. Болтянська Н. І. Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в пресгрануляторі. *Праці ТДАТУ*. 2019. Т. 4, № 19. С. 260–269.

9. Комар А. С. Методика експериментальних досліджень установки для виготовлення пелет з перепелиного посліду. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Т. 2, № 10.
10. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження технологічного процесу гранулювання кормів. *Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці від дня народження Крамарова Володимира Савовича (1906-1987)*, м. Київ. 2022. С. 261–266.
11. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження процесу механічної взаємодії пресуючого механізму гранулятора з матеріалом. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування* : матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф., м. Полтава. 2023. С. 173–177.
12. Sevostyanov M., Osokin A. Methodological Principles and Algorithm for Forming Technogenic Fibrous Materials with Low Bulk Density in a Flat-Matrix Extruder. 2022.
13. Комар А. С., Болтянська Н. І. Гранулювання органічних відходів рослинного походження на прикладі очерету. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Т. 1, № 10.
14. Boltianska N. I., Manita I. Y. Justification of the energy saving mechanism in the agricultural sector. *Engineering of nature management*. 2021. No. 1(19). P. 7–12.
15. Chłopek M., Dzik T., Hryniewicz M. Determining the grip angle in a granulator with a flat matrix. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2014. No. 16. P. 337–340.
16. Hejft R. Selected problems in construction of granulators for plant materials. Part 2. – granulating and briquetting matrix. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 64. P. 30–35.
17. Shkarpetkin E., Osokin A. Features of fibrous materials agglomeration in flat-matrix granulators. *Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019.
18. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Теоретичні дослідження швидкості переміщення частинок сипкого матеріалу в процесі гранулювання. *Праці ТДАТУ*. 2023. Т. 2, № 23. С. 54–66
19. Мілько М. О., Рогач Ю. П., Комар А. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гранулятора з нерухомою матрицею. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2018. № 192. С. 202–209.
20. Döring S. Power from Pellets: Technology and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013. 226 p.

References

1. Korchemnyi, M., Fedoreiko, V., & Shcherban, V. (2001). *Enerhozberezhennia v ahropromyslovomu kompleksi [Energy conservation in the agro-industrial complex]*. Ternopil [in Ukranian].
2. Bratishko, V.V. (2017). Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy pryhotuvannia povnoratsionnykh kombikormiv hvyntovymy hranuliatoramy [Mechanical and technological basics of preparation of complete ration compound feed with screw granulators] . *Extended abstract of doctor's thesis*. Glevakha [in Ukranian].
3. Bratishko, V. V. (2014). Uzghodzhennia konstruktsiinykh parametriv matryts hvyntovykh hranuliatoriv kormiv za tyskom ta propusknoiu zdatnistiu [Coordination of the design parameters of the matrices of screw feed granulators by pressure and throughput]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, *Issue 27*, 187–191 [in Ukranian].
4. Boltyanska, N. (2018). Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. TEKA. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering, 18(2)*, 23–29 [in English].
5. Boltianska, N.I. (2019). Shliakhy vdoskonalennia konstruktsii shesterennykh pres-hranuliatoriv [Ways of improving the designs of gear press granulators]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, *10(109)*, 104–110 [in Ukranian].
6. Boltianska, N.I., & Komar, A.S. (2019). Obgruntuvannia shliakhiv vdoskonalennia protsesu hranuliuvannia u pres-hranuliatorakh z kiltsevoiu matrytseiu [Justification of ways to improve the granulation process in press granulators with a ring matrix]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva – Mechanization of agricultural production, 199*, 176–186 [in Ukranian].
7. Payne, J., Rattink, W., Smith, T., & Winowiski, T. (2001). *Pelleting Handbook. Sarpsborg, Borregaard Lignotech [in English]*.
8. Boltianska, N. I. (2019). Vzaiemodiia presuiuchoho rolyka i materialu v preshranuliatori [Boltyanska N. I. Interaction of the pressing roller and material in the press granulator]. *Pratsi TDATU – Proceedings of TDATU*, *4*(19), 260–269 [in Ukranian].

9. Komar, A. S. (2020). Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen ustanovky dlia vyhotovlennia pelet z perepelynoho poslidu [Methodology of experimental studies of the installation for the production of pellets from quail droppings]. *Naukovyi visnyk TDATU – Scientific Bulletin of TDATU*, *2(10)* [in Ukranian].
10. Trymbach, S. P., & Stepanenko, S. P. (2022). Doslidzhennia tekhnolohichnoho protsesu hranuliuvannia kormiv [Study of the technological process of fodder granulation]. U Zbirnyk tez dopovidei VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia» z nahody 115-yi richnytsi vid dnia narodzhennia Kramarova Volodymyra Savovycha (1906-1987) (s. 261–266). Vydavnychyi tsentr NUBiP Ukrainy [in Ukranian].
11. Trymbach, S. P., & Stepanenko, S. P. (2023). Doslidzhennia protsesu mekhanichnoi vzaiemodii presuiuchoho mekhanizmu hranuliatora z materialom [Studies of the technological process of fodder granulation]. U *Problemy ta perspektyvy rozvytku silskohospodarskoho mashynobuduvannia* (s. 173–177). PDAU [in Ukranian].
12. Sevostyanov, M., & Osokin, A. (2022). Methodological Principles and Algorithm for Forming Technogenic Fibrous Materials with Low Bulk Density in a Flat-Matrix Extruder.
13. Komar, A. S., & Boltianska, N. I. (2020). Hranuliuvannia orhanichnykh vidkhodiv roslynnoho pokhodzhennia na prykladi ocheretu [Granulation of organic waste of plant origin on the example of reed]. *Naukovyi visnyk TDATU – Scientific Bulletin of TDATU. 2020*, *1*(10) [in Ukranian].
14. Boltianska, N. I., & Manita, I. Y. (2021). Justification of the energy saving mechanism in the agricultural sector. *Engineering of nature management*, *1(19),* 7–12.
15. Chłopek, M., Dzik, T., & Hryniewicz, M. (2014). Determining the grip angle in a granulator with a flat matrix. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, *16*, 337–340 [in English].
16. Hejft, R. (2019). Selected problems in construction of granulators for plant materials. Part 2. – granulating and briquetting matrix. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, *64*, 30–35 [in English].
17. Shkarpetkin, E., & Osokin, A. (2019). Features of fibrous materials agglomeration in flat-matrix granulators. U *Conference Series: Materials Science and Engineering* [in English].
18. Trymbach, S. P., & Stepanenko, S. P. (2023). Teoretychni doslidzhennia shvydkosti peremishchennia chastynok sypkoho materialu v protsesi hranuliuvannia [Theoretical studies of the speed of movement of particles of loose material in the granulation process]. *Pratsi TDATU – Proceedings of TDATU*, *2*(23), 54–66 [in Ukranian].
19. Milko, M. O., Rohach, Yu. P., & Komar, A. S. (2018). Obgruntuvannia konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv hranuliatora z nerukhomoiu matrytseiu [Justification of the structural and technological parameters of the granulator with a fixed matrix]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko*, 192, 202–209 [in Ukranian].
20. Döring, S. (2013). Power from Pellets: Technology and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Serhii Stepanenko, DSc., Senior Researcher, **Serhii Trimbach,** Applicant
Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Glevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Process of Forming Granules From Bulk Materials in Ring Matrix Granulators

Based on the mechanism and kinetic regularities of granule formation from bulk materials, a mathematical model of the process occurring in ring matrix granulators has been developed. The studies have shown that the process of granulation of bulk materials is stochastic, as the resulting granulometric composition is polydisperse, and this is explained by the uneven granulation process, which depends on the physico-mechanical properties of the binding material, directly from the particles of bulk material, as well as phenomena such as coagulation and destruction, wear, and deformation.

During the study of the mechanism of granule formation from bulk material, it was established that the layering of layers on the surface of a cylindrical granule occurs along a spiral curve. In all cases of the influence of the geometry and dynamics of the rotary motion of the ring matrix, the shape of the granule approximates a cylinder, except for strongly deformed granules. A mathematical model was developed that generally reflects the dynamics of asymmetric granule growth due to its compaction and deformation. The obtained equations describe the process of forming granules from bulk materials in ring matrix granulators.

granulation, mechanism of granule formation, physico-mechanical properties, kinetic regularities, mathematical model

Одержано (Received) 02.12.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.724 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.256-263

М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, пров. наук. співр.
Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
В.М. Гвоздецький, старший дослідник, канд. техн. наук, **Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: student.phmi@gmail.com, marko60@ukr.net, gvosdetcki@gmail.com, 880988@ukr.net

Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості та корозійну стійкість електродугових покриттів

Досліджено механічні властивості, хімічну мікрогетерогенність та корозійну стійкість у 3% водному розчині NaCl електродугових покриттів з порошкових дротів (ПД) залежно від компонентного складу шихти, використаного під час їх виготовлення. Показано, що покриттям з ПД властива висока неоднорідність за хімічним складом, що відрізняє їх від покриттів, отриманих розпилюванням суцільних дротів. Адже подрібнені повітряним струменем краплини розплаву ПД, що формують покриття, суттєво різняться за хімічним складом. Такий градієнт спричинений неповним розплавленням і змішуванням складників шихти та сталевої оболонки в дузі між торцями ПД під час електродугового напилювання покриттів. Запропоновано додавати до складу шихти ПД порошки, які забезпечили би в краплинах розплаву ПД необхідну кількість хрому, бору, вуглецю. А саме, додавання до шихти ПД порошків ферохрому (ФХ), карбіду бору (В4С), ферохромбору (ФХБ), феросплавів (FeSi, FeMn) та самофлюсу ПГ-10Н-01 дало змогу підвищити гомогенність розплаву ПД та активізувати утворення евтектик між складниками шихти ПД 90Х17РГС та ПД 90Х17Р3ГС. Завдяки цьому добились нижчої хімічної мікрогетерогенності отриманих покриттів та забезпечили їм високу корозійну тривкість, близьку до корозійної тривкості нержавіюча сталі Х18Н9Т.

покриття, порошкові дроти, мікрогетерогенність, мікротвердість, корозійна тривкість

Постановка проблеми. Електродугове напилювання покриттів поширене у багатьох галузях промислового виробництва, зокрема для відновлення геометрії зношених в експлуатаційних умовах деталей машин, для підвищення їх захисту від абразивного та газоабразивного зношування (причому, і за кліматичних, і за технологічно обумовлених підвищених температур) [1-4]. Як правило, напилювання суцільними, однорідними за хімічним складом дротами дає змогу отримати достатньо гомогенні за хімічним складом електродугові покриття (ЕДП). Проте за їх хімічним складом такі ЕДП істотно відрізняються від використаного для розпилення дроту. Цьому сприяє інтенсивне вигоряння наявних у краплинах розплаву суцільного дроту вуглецю, випаровування таких елементів як Zn, Mn, Cr (з високою пружністю дисоціації їх парів) та оксидоутворення через легке окиснення таких складників як Al, Ti, Cr і Fe.

Покриття, напилені із використанням порошкових дротів (ПД), відзначаються високою хімічною неоднорідністю, що істотно відрізняє їх від ЕДП із суцільних дротів.

© М.М. Студент, С.І. Маркович, В.М. Гвоздецький, Х.Р. Задорожна, 2023

Це зумовлено різним хімічним складом краплин, що утворюються із розплаву ПД та переносяться струменем повітря до поверхні підкладки, формуючи на ній покриття. Неповне сплавлення шихти ПД зі сталевою оболонкою під час електродугового напилювання ЕДП зумовлює таку їх гетерогенність. Адже ванна розплавленого металу між торцями ПД миттєво (впродовж часу, сумірного часткам секунди) подрібнюється повітряним струменем на дрібні краплі розплаву і завдяки високому тиску повітря переміщується до поверхні для напилювання. Тому шихта з елементами легування у її складі (у тому числі у важко плавкими такими як ФХ, B_4C, ФХБ не встигає повною мірою розплавитися і перемішатися з розплавом сталевої оболонки. Зрозуміло, що через це диспергувані повітряним струменем краплини розплаву ПД матимуть різний хімічний склад і, як наслідок, покриття, утворені з цих краплин на поверхні підкладки, будуть характеризуватися високою неоднорідністю та значною хімічною гетерогенністю. Зрозуміло, що хімічна гетерогенність отриманих ЕДП впливатиме на їх фізико-механічні властивості за різних експлуатаційних температур і особливо відчутно за впливу корозивних середовищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Літературні джерела засвідчують, що застосування ПД для отримання ЕДП дає змогу формувати покриття із високими експлуатаційними характеристиками (особливо за впливу корозійно-активних технологічних середовищ) [5-8]. Такі покриття застосовують для відновлення геометрії зношених деталей машин, для захисту робочих елементів і від абразивного зношування (причому і за кімнатних, і за підвищених температур), і від корозійно-абразивного зношування за експлуатації в технологічних середовищах [7, 8]. Разом з тим при їх експлуатації в корозійних середовищах через високу хімічну неоднорідність ЕДП (особливо через градієнт за вмістом хрому на переходаж від ламелі до ламелі покриття) в них виникають гальванічні пари, які сприяють їх швидкому знищенню. Тому пошук шляхів зниження хімічної гетерогенності ЕДП, сформованих розпилюванням ПД, відносять до завдань, важливих і актуальних в багатьох застосунках.

Постановка завдання. Для ефективного застосування деталей, відновлених нанесенням ЕДП із ПД, в корозійних середовищах перш за все слід з'ясувати як впливає компонентний склад шихти ПД на їх хімічну гетерогенність. Це основа для розроблення нових ПД для формування ЕДП з високою зносостійкістю та достатньо високим вмістом легувальних елементів, необхідних для забезпечення їх ефективної експлуатації в технологічних середовищах.

Виклад основного матеріалу. Для формування ЕДП використали оригінальне устаткування, виготовленого на основі ідеї і конструкторської розробки Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (рис. 1). Для напилювання ЕДП використали модельні ПД діаметром 2,0 мм, створені як базові (систем легування Fe–Cr–C та Fe–Cr–B).

Типова схема формування електродугових покрит

рис.5

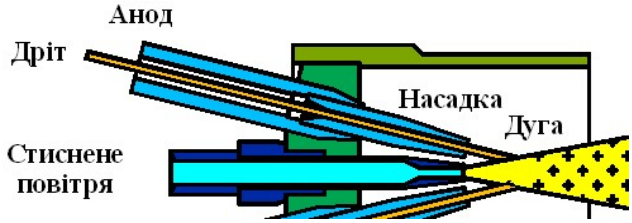


Рисунок 1 – Принципова схема розпилювання краплин розплаву порошкового дроту та формування електродугових покриттів на їх основі

Джерело: розроблено авторами

Кількісно величину хімічної гетерогенності ЕДП оцінювали за коефіцієнтом хімічної мікрогетерогенності $K_{мг}$, який визначали з виразу:

$$K_{МГ} = (\sum_{i=1}^{n} |c_{сер} - c_i|) \; / \; n \times c_{сер},$$

де n – кількість прямокутних ділянок на поверхні покриття (площею $35 \cdot 10^{-4}$ мм^2), в межах яких методом мікрорентгенівського спектрального аналізу фіксували вміст кожного з елементів легування c_i як в межах кожної окремої ламелі, так і як середній їх вміст $c_{сер}$ у ЕДП.

Вибір компонентів шихти ПД для мінімізації хімічної мікрогетерогенності ЕДП. Для забезпечення високої корозійної стійкості ЕДП в агресивних середовищах необхідно було знизити їх хімічну мікрогетерогенність та досягти достатньо високий вміст хрому (він мав би бути понад 12 мас. %) у кожній з його ламелей. Для досягнення цієї мети до складу шихти ПД додавали інгредієнти, які уможливлювали формування евтектик з низькою температурою плавлення з розчиненням у собі таких тугоплавких складників шихти ПД як карбіди, бориди, тугоплавкі метали та сплави.

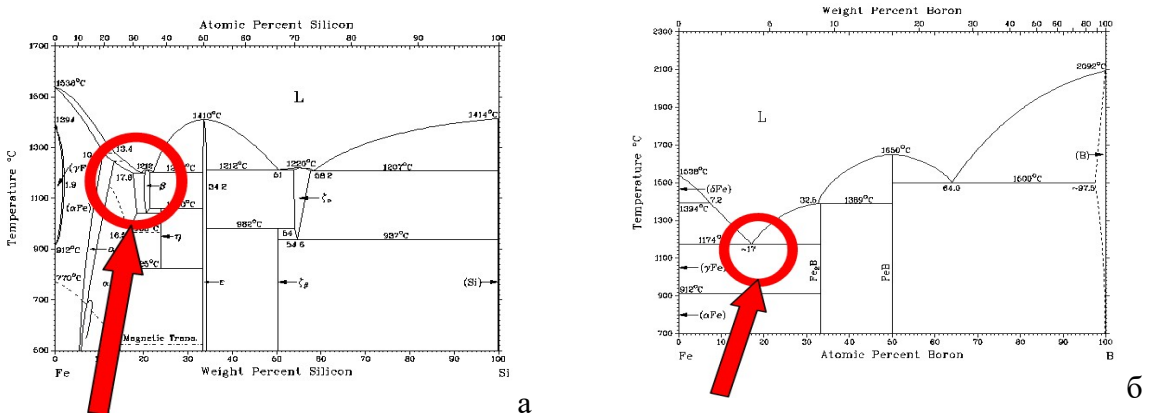
Важливо також, що евтектичні сплави з низькою температурою плавлення можуть окрім того виконувати функцію ще й самофлюсу. Тому вони спроможні взаємодіяти із тугоплавкими оксидами (зокрема такими як Cr_2O_3 та Al_2O_3, температура плавлення яких $T_{пл}$ досягає 2435 та 2050ºС відповідно), утворюючи при цьому сполуки оксидів, які як правило починають плавитися за відчутно нижчої температури.

Для ЕДП, що експлуатуватимуться в умовах сумісного впливу корозивних середовищ та абразивного зношування, слід використовувати ПД з якомога меншим діаметром. Проте досить часто це важко, або взагалі неможливо досягти. Адже, чим менший діаметр ПД, тим важче досягти потрібний вміст хрому, вуглецю та бормістких компонентів у складі його шихти. Тому, щоб забезпечити необхідну корозійну стійкість ЕДП (з вмістом хрому у кожній з його ламелей не меншим за 12 мас. %), рекомендовано використовувати ПД діаметром не меншим за 2,0 мм.

Для обґрунтування оптимального складу шихти ПД дослідили п’ять дослідних варіантів ПД, які відрізнялися за компонентним складом шихти (табл. 1). До їх складу входили хром, бор, вуглець місткі компоненти (Cr, ФХ, B_4C, ФХБ) з додаванням FeSi, FeMn та самофлюсу ПГ-10Н-01, які сприяли утворенню евтектик між складниками шихти, гомогенізували склад розплаву ПД та знижували мікрогетерогенність ЕДП (рис. 2).

Таблиця 1 – Механічні властивості корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів з різним компонентним складом шихти.

Позначення, хімічний склад порошкового дроту (компонентний склад шихти)	Вміст Cr у ламелях, мас. %	$K_{МН}$	Залишкові напруження розтягу, МПа	Когезійна міцність, МПа	Мікро-твердість, $HV_{0,3}$	Струм корозії, 10^{-4} mA
№1. 90Х17Р2ГС, склад шихти: Cr+B_4C+FeSi+FeMn	17,1	0,07	43,6	140	610	6
№2. 20Х16Р3Н2ГС, склад шихти:$FeCrB_2$ + Cr + ПГ10-Н-01	16,4	0,06	41,9	100	690	5
№3. 90Х17РГС, склад шихти: $FeCrB_2$+ ФХ+Cr+FeSi+FeMn	17,3	0,05	76,9	185	625	2
№4. 90Х17Р3ГС, склад шихти: Cr + B_4C + FeSi+FeMn	17,0	0,1	66,8	150	595	5
№5. Х17Р3С, склад шихти: $FeCrB_2$ +Cr+ FeSi	17,1	0,15	6,17	80	700	14



а б

Рисунок 2 - Діаграми стану для заліза та кремнію (а) та заліза й бору (б), що можуть утворювати легкоплавкі евтектики Fe-Si та Fe-B, температура плавлення яких становить відповідно 1212 ^{O}C і 1174 ^{O}C.

Джерело: розроблено авторами

Додавання до шихти ПД карбіду бору (B_4C) у чистому вигляді не забезпечило достатньої твердості ЕДП (табл. 1), отриманим розпилюванням ПД №1 (90Х17Р2ГС) та ПД №4 (90Х17Р3ГС). Вважали, що це зумовлено тим, що в цьому випадку часточки B_4C повністю не розчинились у розплаві ПД, із якого формували покриття. Під час напилювання ЕДП повітряний струмінь під високим тиском видував значну їх частину із шихти ПД і, тим самим, ці часточки не приймали участі у формування покриття. При цьому когезійна міцність таких покриттів показала їх середній рівень (табл. 1).

Заміри мікротвердості показали (табл. 1), що найвищої твердості досягли на ЕДП з ПД №2 (20Х16Р3Н2ГС) та ПД №5 (Х17Р3С). Це відбувалося завдяки наявності у шихті ПД 3 мас.% бору, який потрапляв до їх шихти у складі порошку ферохромбору ФХБ-2. Фазовий аналіз цих ЕДП виявив в їх феритній структурі виділення дрібнодисперсних боридів FeCrB та $FeCr_2B$. Разом з тим когезійна міцність цих покриттів не перевищила 100 МПа (табл. 1). Це пояснили тим, що під час напилювання ЕДП у їх структурі могли виникати залишкові напруження розтягу першого роду, які, як правило, сприяють розтріскуванню покриттів під час їх подальшого механічного оброблення. Тому перед нанесенням ЕДП з таких ПД основу для напилювання слід підігрівати до 150…200 ^{o}C.

Середню твердість серед аналізованих варіантів ЕДП показали покриття із ПД №3 (90Х17РГС). Мартенситна матриця, додатково зміцнена дрібнодисперсними включеннями боридів $FeCr_2B$ забезпечила їх відносно високу твердість. Такі покриття виявили суттєво вищу когезійну міцність (до 185 МПа) та середній рівень залишкових напружень першого роду 43,6 МПа (табл. 1), що зумовлено наявністю в структурі таких покриттів аустенітно-мартеситної матриці.

Під час кристалізації та охолодження краплин на холодній поверхні напиленої деталі покриття зменшується у розмірах, а масивніша основа чинить опір цьому, що спричиняє напруження розтягу у поверхневих шарах ЕДП. Це зумовлює формування колових напружень першого роду. Оскільки коефіцієнт термічного розширення матренситу є найнижчим, а аустеніту – найвищим, то внаслідок формування матричної фази мартенситу у покриттях виникали лише незначні напруження розтягу. Такі покриття легше обробляти, оскільки для їх механічного оброблення можна застосовувати значно жорсткіші режими шліфування без загрози виникнення у них тріщин чи відшаровування отриманих покриттів від підкладки.

Корозійна тривкість електродугових покриттів із розроблених ПД після їх різної експозиції в 3%-му водному розчині NaCl. Із залученням потенціодинамічного

методу встановили закономірності взаємодії ЕДП, нанесених ПД п'яти запропонованих компонентних складів шихти, із 3% розчином NaCl. З отриманих поляризаційних кривих прийшли до висновку, що за характером корозійної взаємодії з середовищем усі аналізовані ЕДП з розроблених ПД мало чим відрізняються одне від одного (рис. 3, а, б, в, г).

Отже, попри відмінності розроблених ЕДП за хімічним складом їх електрохімічні параметри та характер зміни поляризаційних кривих особливо не змінюються (рис. 3). Так при витримуванні зразків із покриттями в середовищі впродовж 1 години лише потенціал корозії, зафіксований для покриття з ПД №3 (90Х17РГС), якому властивий практично найвищий середнім вміст хрому та найнижчий коефіцієнт $K_{MГ}$, суттєво змістився в область більш від'ємних значень порівняно з потенціалом корозії для ЕДП, нанесеного з ПД №5 (Х17Р3С). Щодо ЕДП, нанесених ПД іншого компонентного складу (№2, №4) то їх потенціали корозії виявилися лише трішки більш позитивними порівняно з ЕДП з ПД №3 (90Х17РГС). При цьому відзначили, що зміна густини струму корозії для усіх аналізованих ЕДП, нанесених розпилюванням розроблених ПД, не перевищувала одного порядку.

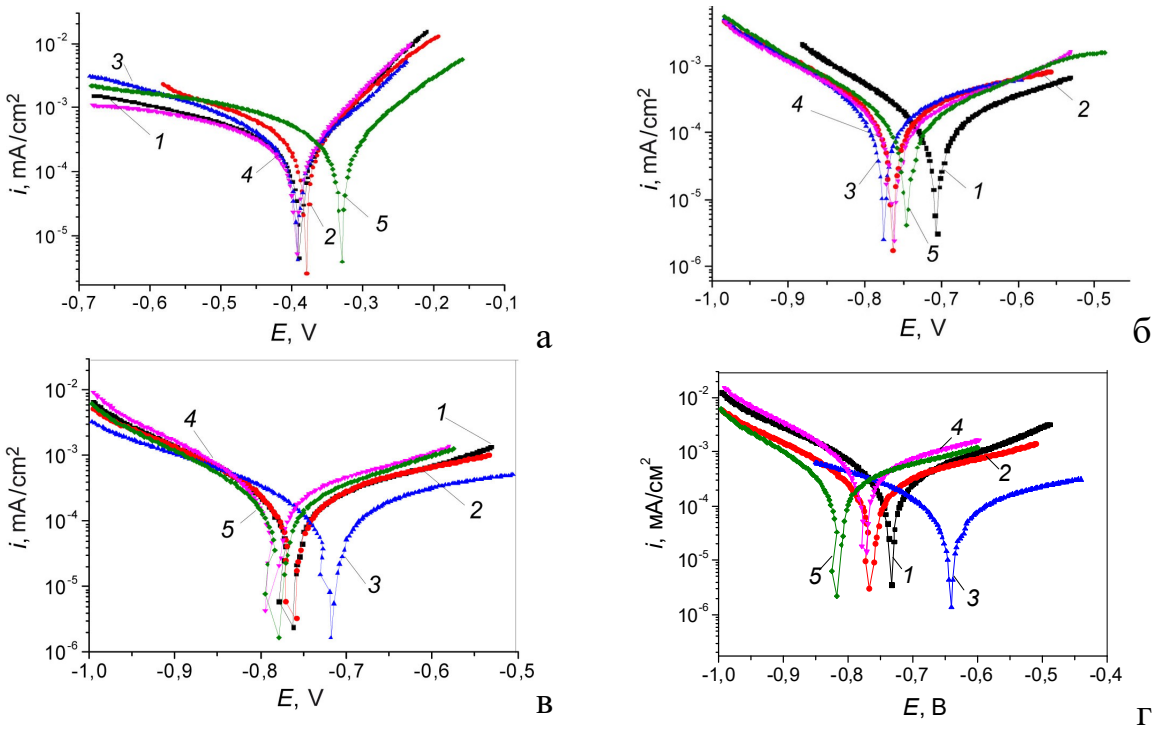


Рисунок 3 – Потенціодинамічні криві напилених електродугових покриттів з порошкових дротів різного складу: 1 – ПД 90Х17Р2ГС; 2 – ПД №2 (20Х16Р3Н2ГС); 3 – ПД №3 (90Х17РГС); 4 – ПД 90Х17Р3ГС; 5 – ПД №5 (Х17Р3С) після витримки їх у 3% розчині NaCl протягом 1 год (а), 1 доби (б), 3 діб (в) та 7 діб (г)

Джерело: розроблено авторами

Послідовність розташування потенціодинамічних кривих, отриманих на ЕДП з аналізованих ПД після збільшення тривалості витримування зразків з покриттями у 3%-му розчині NaCl (до 1 доби), практично не змінилася (рис. 3, б).

Разом з тим виявилось, що зі збільшенням тривалості витримування зразків з покриттям в корозивному середовищі до 1 доби потенціал корозії сталі з покриттям зсунувся в область негативніших значень на 0,3…0,4 В (рис. 3г), порівняно із зафіксованим за експозиції у цьому ж середовищі, але впродовж 1 год (рис. 3в). Таке зміщення потенціалу корозії до негативніших значень пояснили зміною хімічного

складу ламелей ЕДП, напилених різними ПД. Зокрема, за наявності в ЕДП таких елементів як Al, Mn та Ni, які рівномірно розподілялись в ламелях і виконували роль анодних ділянок. Тоді як сталь основи виконувала функцію катода.

На усіх напилених ЕДП виявили відкриту поруватість, що суттєво впливало на корозійну поведінку як самого ЕДП, так і матеріалу основи. Адже завдяки цій поруватості корозивне середовище проникало по наскрізних порах до основи та створювало сприятливі передумови для реалізації підплівкової корозії. Продукти корозії при цьому накопичувалися вздовж меж розділу ЕДП з основою, порушували їх адгезію і полегшували їх відшарування.

Аналіз результатів потенціодинамічних досліжень ЕДП (рис. 3) виявив, що на початку занурення зразків у корозивне середовище процес електрохімічної корозії протікав з перевагою катодного контролю ($b_к > b_a$). Катодне відновлення окислювача при цьому лімітує процес електрохімічної корозії (рис. 3). Зі збільшенням тривалості експозиції покриттів у 3%-му розчині NaCl корозійний процес починає протікати за анодного контролю ($b_a > b_к$), а лімітуючою стадією при цьому стає реакція анодного окислення металу (рис. 3 б,в,г).

Зміна потенціалу корозії ЕД, напилених на сталеву основу, (рис. 3 в,г) засвідчила анодну природу корозійних процесів, які супроводжують роботу покриття в корозивному середовищі. При цьому сталева основа залишатиметься катодно захищеною, доки покриття повністю не буде знищене через корозійне розчинення.

За витримування зразків із ЕДП у корозивному середовищі понад 2 доби їх струми корозії зростали, тобто їх корозійна тривкість зменшувалася. Спричинено це наскрізною поруватістю. Адже за тривалої експозиції середовище могло проникати до сталевої основи і спричиняти підплівкову корозію з відшаруванням покриття від основи (рис. 4).

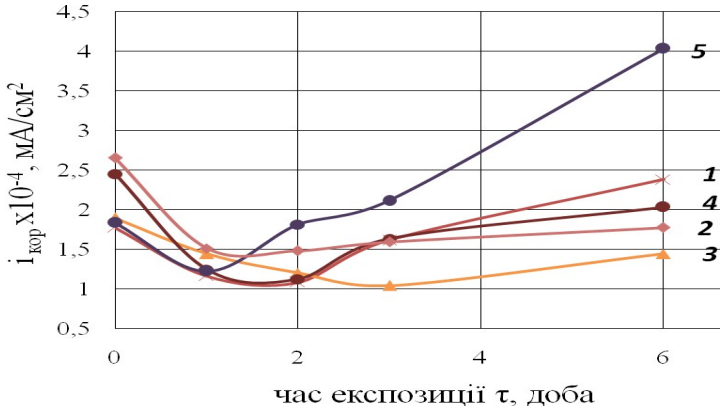


Рисунок 4 – Вплив тривалості експозиції ЕДП з різних ПД (1 – ПД 90Х17Р2ГС; 2 – ПД №2 (20Х16Р3Н2ГС); 3 – ПД №3 (90Х17РГС); 4 – ПД 90Х17Р3ГС; 5 – ПД №5 (Х17Р3С) в 3% розчині NaCl на густину струму (а) та потенціал (б) корозії, визначені за результатами потенціодинамічних досліджень

Джерело: розроблено авторами

Зазначимо, що частина хрому під час формування покриттів витрачається на утворення боридів. Внаслідок цього в твердому розчині хрому залишається менше. Це призводить до значної мікрогетерогенності покриття через різницю за вмістом хрому в різних ламелях покриття. Як наслідок виникає велика кількість гальванічних пар, що інтенсифікує електрохімічну корозію.

За наявності у шихті ПД90Х17РГС та ПД90Х17Р3ГС хрому, ферохрому, ферокремнію та феромарганцю мінімізувало хімічну мікрогетерогенність ЕДП і, як

наслідок, забезпечувало їм високу корозійну тривкість - 0,0002 мА/см^2, близьку до корозійної тривкості нержавіючої сталі Х18Н9Т – 0,0001 мА/см^2.

Висновки:

1. Для забезпечення повного сплавлення компонентів шихти ПД між собою та з його сталевою оболонкою запропоновано додавати до шихти ПД порошки феросплавів Fe-Mn, Fe-Si, які здатні взаємодіяти із тугоплавкими компонентами шихти з утворенням низькотемпературних евтектик. Експериментально обґрунтовано правомірність такого компонентного складу шихти ПД як ефективний спосіб зниження температури плавлення складників ПД.

2. Додавання до складу шихти ПД на основі ферохробору та ферохрому порошків ферокремнію, феромарганцю та самофлюсного сплаву ПН-10Н-01 забезпечило високу твердість ЕДП, малу їх гетерогенність за вмістом хрому у ламелях і, як наслідок, високу корозійну тривкість, яка сумірна з властивою нержавіючій сталі.

Список літератури

1. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / M.M.Student, S.I. Markovych, V.M. Hvozdetskyi, O.S. Kalakhan, V.M. Yuskiv. *Materials Science,* 2022, Vol.58(1), pp. 96–104.
2. Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings / H.V. Pokhmurs'ka, M.Ya. Holovchuk, Yu.V. Dz'oba, V.M. Hvozdets'kyi, L.V. Dzyubyk. *Materials Science*. 2018. Vol.53, №6. P. 868–874.
3. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdets'kyi, *Materials Science*, 2016, Vol. 52(2), pp. 165–172.
4. Студент М.М., Головчук М.Я., Гвоздецький В.М. Вплив хімічного складу порошкових дротів на структуру та зносостійкість покриттів різного хімічного складу. *Проблеми трибології*. 2017. № 3. С. 56-61.
5. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering Korobov Yury. *Coatings*. 2018. Vol.8(2). 71 p.
6. The structure and properties of electric arc coatings based on ferroboron obtained from powder wires / AL Borisova, IV Mitz, TV Kaida [et al.]. *Automatic welding*. 1991. 9. P. 66–68.
7. Dallaire S., Levert H. Synthesis and deposition of TiB2 containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 1992. 50, 2 . P. 241–248.
8. Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying / Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014. Article ID 836739 https://doi.org/10.1155/2014/836739.

Referencis

1. Student, M.M., Markovych, S.I., Hvozdetskyi, V.M., Kalakhan, O.S., Yuskiv, V.M. (2022) Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings. *Materials Science, 58(1),* 96–104 [in English].
2. Pokhmurs'ka H.V., Holovchuk M. Ya., Dz'oba Yu. V., Hvozdets'kyi V. M., Dzyubyk L. V. (2018). Influence of the composition of charge of powder wires on the structure and properties of electric-arc coatings. *Materials Science*, *Vol.53*, 6, 868–874 [in English].
3. Stupnyts'kyi, T.R., Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdets'kyi, V.M. (2016). Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*, *52(2),* 165–172 [in English].
4. Student, M.M., Holovchuk, M.Ya. & Hvozdets'kyj, V.M. (2017). Vplyv khimichnoho skladu poroshkovykh drotiv na strukturu ta znosostijkist' pokryttiv riznoho khimichnoho skladu [Influence of chemical composition of flux-cored wires on the structure and wear resistance of coatings of different chemical composition]. *Problemy trybolohii – Problems of tribology*, *3*, 56-61 [in Ukrainian].
5. Korobov, Yury. (2018). Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering *Coatings*, *8(2),* 71 [in English].

6. Borisova, A.L., Mitz, I.V., Kaida, T.V. et al. (1991).The structure and properties of electric arc coatings based on ferroboron obtained from powder wires. *Automatic welding*, *9*, 66–68 [in English].
7. Dallaire, S. & Levert, H. (1992). Synthesis and deposition of TiB2 containing materials by arc spraying. *Surface and Coatings Technology*, *50*, 2, 241–248 [in English].
8. Ana Arizmendi-Morquecho, Araceli Campa-Castilla, C. Leyva-Porras, Josué Almicar Aguilar Martinez, Gregorio Vargas Gutiérrez, Karla Judith Moreno Bello, L. López López. (2014). Microstructural Characterization and Wear Properties of Fe-Based Amorphous-Crystalline Coating Deposited by Twin Wire Arc Spraying. *Advances in Materials Science and Engineering*. *Vol. 2014.* Article ID 836739 https://doi.org/10.1155/2014/836739 [in English].

Mykhailo Student, DSc., Senior Researcher
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine
VolodymyrHvozdetskii, PhD tech. sci., Research, **Khrystyna Zadopozna**, PhD tech. sci., Research
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Research on the Dependence of the Microhardness of Modified Surfaces of Titanium Alloys on the Depth of Nitrogen Saturation During Vacuum Ion Plasma Nitriding in the Thermocyclic Mode

Electric arc spraying of coatings is common in many branches of industrial production, in particular to restore the geometry of machine parts worn in operational conditions, to increase their protection against abrasive and gas-abrasive wear (at the same time, both at climatic and at technologically determined elevated temperatures). Coatings sprayed using powdered wires are characterized by high chemical heterogeneity, which significantly distinguishes them from electric arc coatings made of solid wires. This is due to the different chemical composition of the droplets formed from the molten powder wires and carried by the air jet to the surface of the substrate, forming a coating on it. The charge with alloying elements in its composition (including difficult-to-melt ones such as FH, B4C, FHB) does not have time to fully melt and mix with the melt of the steel shell. It is clear that because of this, the melt droplets of flux-cored wires dispersed by an air jet will have a different chemical composition and , as a result, the coatings formed from these droplets on the surface of the substrate will be characterized by high heterogeneity and significant chemical heterogeneity, which will affect their physical and mechanical properties at different operating temperatures and especially when exposed to corrosive environments.

To ensure high corrosion resistance of electric arc coatings in aggressive environments, it was necessary to reduce their chemical microheterogeneity and achieve a sufficiently high chromium content (it should be more than 12 wt.%) in each of its lamellae. To achieve this goal, ingredients were added to the composition of the charge, which enabled the formation of eutectics with a low melting temperature, with the dissolution of such refractory components of the powder wire charge as carbides, borides, refractory metals and alloys. Microhardness measurements showed that the highest hardness was achieved by electric arc coatings made of powder-coated wires №. 2 (20Х16Р3Н2ГС) and powder-coated wires №. 5 (Х17Р3С). This happened due to the presence in the charge of 3 wt.% of boron, which entered their charge as part of the FHB-2 ferrochromiumboron powder. Phase analysis of these EDPs revealed the segregation of finely dispersed FeCrB and FeCr2B borides in their ferrite structure. However, the cohesive strength of these coatings did not exceed 100 MPa. This was explained by the fact that during filing, residual first-order tensile stresses could occur in their structure, which, as a rule, contribute to the cracking of the coatings during their subsequent mechanical processing. Therefore, before applying coatings from such powdered wires, the base for spraying should be heated to 150...200ºC.

Conclusions. 1. To ensure complete fusion of the components of the powder-coated wire charge with each other and with its steel sheath, it is proposed to add Fe-Mn, Fe-Si ferroalloy powders to the powder-coated wire charge, which are able to interact with the refractory components of the charge with the formation of low-temperature eutectics. The legality of such a component composition of the charge of flux-cored wires as an effective method of reducing the melting temperature of the components has been experimentally substantiated. 2. The addition of ferrosilicon, ferromanganese powders and self-fluxing alloy PH-10H-01 to the charge of flux-cored wires based on ferrochromium and ferrochromium ensured high hardness of electric arc coatings, low heterogeneity of the chromium content in the lamellae, and, as a result, high corrosion resistance, which comparable to that of stainless steel.

coating, powder wires, microheterogeneity, microhardness, corrosion resistance

Одержано (Received) 14.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 539.319 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.264-270

А. В. Рутковський, ст. наук. співр., канд. техн. наук
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Украї
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, **С.О. Магопець,** доц., канд. техн. наук,
В.С. Маркович, магістр
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: rut2000@ukr.net, marko60@ukr.net, magserg@ukr.net, markovich241082@gmail.com

Дослідження залежності мікротвердості модифікованих поверхонь титанових сплавів від глибини насичення азотом при вакуумному іонному плазмовому азотуванні в термоциклічному режимі

Проведено дослідження титанових сплавів зі зміцненим азотованим шаром методом вакуумного іонного плазмового азотування в термоциклічному режимі для визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на мікротвердість. Встановлено, що величина мікротвердості залежить від фазового складу поверхні. На поверхні сплаву ВТ1-0 після азотування утворюються три фази TiN, Ti_2N і $Ti_\alpha(N)$. Твердість поверхневого шару азотованого титану залежить від співвідношення цих фаз і тим вища, чим більша кількість фази TiN. За рахунок зміни параметрів процесу вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі (температури, тиску, складу насичуючого середовища і часу азотування) можна змінювати фізико-механічні характеристики (глибину дифузійного шару до 300 мкм, мікротвердість до 9600 МПа, різний градієнт твердості по глибині, фазовий склад азотованих поверхонь і т.д.), отримувати поверхневі шари з різним фазовим складом (α, γ' та ε - фази) із нітридною зоною і без неї, залежно від температури, тиску, складу середовища, що насичує, та розміру температурних циклів, що дозволяє оптимізувати властивості поверхневого шару в конкретних умовах експлуатації. Збільшення часу азотування титанових сплавів сприяє збільшенню товщини азотованого шару до 300 мкм. Додавання в насичуюче середовище інертних газів гелію і аргону сприяє збільшенню пластичності та товщини азотованого шару.

титанові сплави, модифікована поверхня, азотування, мікротвердість

Постановка проблеми. Титанові сплави мають унікальні властивості, серед яких висока питома міцність, корозійна стійкість і досить висока температура плавлення. Однак, застосування даних матеріалів обмежує їх невисока твердість, надзвичайно низька зносостійкість, висока схильність до налипання, великий коефіцієнт тертя в парі практично з усіма матеріалами, висока хімічна активність під час нагрівання вище 500°С та чутливість до концентраторів напружень. Дані недоліки можна усунути шляхом нанесення покриттів або за рахунок зміни структурного стану поверхневих шарів матеріалу за допомогою їх модифікації різними технологіями [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальним є модифікація поверхні сплавів титану шляхом використання методів з мінімальним або низьким термічним впливом, зокрема, методом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі. При цьому використання ефекту аномального масопереносу азоту в поверхні деталі, що обробляється, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення та виключення тліючого розряду та циклічної зміна

© А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.О. Магопець, В.С. Маркович, 2023

температури дозволяє скоротити в 3…5 разів потрібну потужність джерел електричного живлення. Така модифікація поверхні підвищить довговічність, межу витривалості та зносостійкість титанових сплавів. Збільшення часу азотування титанових сплавів сприяє збільшенню товщини азотованого шару до певних меж по параболічній залежності. Додавання в насичуюче середовище інертних газів гелію і аргону сприяє збільшенню пластичності та товщини азотованого шару [5–9]. Тому дослідження впливу глибини насичення азотом на мікротвердість поверхні титанових сплавів та можливості управління процесом формування при даній технології модифікації є актуальною задачею.

Постановка завдання. Провести дослідження титанового сплаву зі зміцненим азотованим шаром для отримання експериментальних результатів щодо визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на мікротвердість. Визначити характеристики поверхневого шару, визначити закономірності їх формування для встановлення можливості керування ними внаслідок зміни параметрів технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу. Дослідження мікротвердості зміцнених поверхневих шарів проводилися на металографічних шліфах за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М, кут між протилежними гранями алмазної пірамідки − 136^0, навантаження − 0,98 Н, час витримування під навантаженням − 20 с, крок вимірювання по товщині зразка − 30…40 мкм. Визначали середнє значення мікротвердості за результатами п’яти вимірювань. В процесі досліджень властивостей поверхні титану ВТ1-0 після різних режимів азотування контролювались товщини нітридного шару з використанням мікроструктурного аналізу на мікроскопі МІМ-10 і фазовий склад поверхневого шару на установці ДРОН-3М.

В таблиці 1 наведені результати досліджень мікротвердості поверхні титану ВТ1-0 після азотування за різними режимами. З таблиці видно, що в результаті азотування мікротвердість поверхні збільшилась від 1998 МПа до 7390 МПа (режим 1). При цьому в залежності від значень технологічних параметрів мікротвердість поверхневого шару змінювалась від 5126 МПа (режим 8) до 7390 МПа (режим 1). Неазотований ВТ1-0 має вихідну мікротвердість поверхні після шліфування ~ 2000 МПа.

Таблиця 1 – Характеристики азотованого шару титанового сплаву ВТ1-0 після різних режимів вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі

№ режиму	Параметри азотування			Мікро-твердість поверхні H_{100}, МПа	Товщина, мкм		Фазовий склад поверхні, об’ємних %		
	T,° C	p, Па	Вміст Ar, %		Азот. шару	Нітридної зони	TiN	Ti_2N	$Ti_2(N)$
1	680	400	70	7390	320	4,0	15,0	18,2	66,8
2	680	240	70	7350	290	3,0	6,9	25,9	67,2
3	640	400	70	5390	180	1,0	1,0	23,5	75,5
4	640	240	70	5863	200	5,0	9,7	18,2	72,1
5	660	320	70	6330	260	9,0	10,6	21,5	67,9
6	680	320	95	6615	240	8,0	10,9	21,2	67,9
7	680	320	45	6420	220	4,5	6,1	20,4	73,5
8	640	320	95	5126	260	0,8	–	24,0	76,0
9	640	320	45	5390	175	4,3	7,9	26,2	65,9
10	660	320	70	6355	250	9,0	10,8	21,6	67,6

Продовження таблиці 1

11	660	400	95	6803	230	4,0	14,1	16,5	69,4
12	660	400	45	6307	350	8,5	7,1	21,2	71,4
13	660	240	95	7182	360	3,5	10,5	20,9	69,5
14	660	240	45	5673	200	10,0	6,5	17,1	76,5
15	660	320	70	6307	250	9,0	10,4	20,8	68,8
Опт.	666	240	45	6760	280	9,5	11,3	22,1	66,6

Джерело: розроблено аторами

Величина мікротвердості залежить від фазового складу поверхні. Як видно з таблиці 2, на поверхні сплаву ВТ1-0 після азотування утворюються три фази TiN, Ti_2N і $Ti_\alpha(N)$. Твердість поверхневого шару азотованого титану залежить від співвідношення цих фаз і тим вища, чим більша кількість фази TiN. Найвищу твердість має фаза TiN, меншу – Ti_2N. Твердість зони внутрішнього азотування ($Ti_\alpha(N)$) змінюється в залежності від концентрації в ній азоту.

Вакуумне іонне плазмове азотування в термоциклічному режимі забезпечує високу твердість титанових сплавів. Товщина твердого нітридного шару при азотуванні титанових сплавів складає не більше 15÷20 мкм, під яким знаходиться зона внутрішнього азотування меншої твердості, яка поступово зменшується до твердості основи.

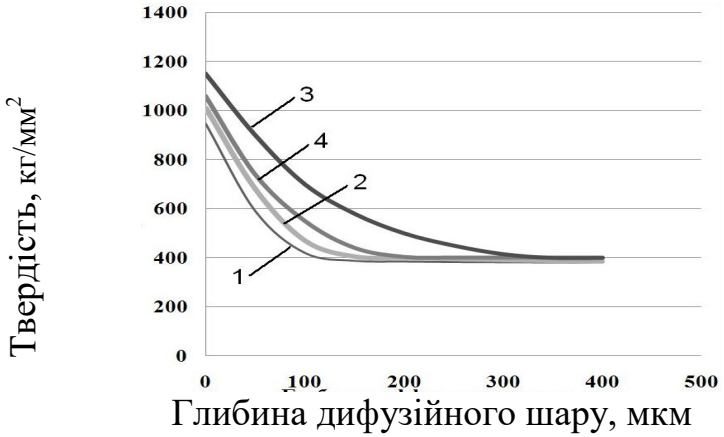
Вакуумне іонне азотування в термоциклічному режимі титанових сплавів дозволяє змінювати в широких межах фізико-механічні характеристики (глибину дифузійного шару до 500 мкм, мікротвердість до 9600 МПа, фазовий склад азотованих поверхонь і т.д.), отримувати поверхневі шари з різним фазовим складом (α, γ' та ε - фази) із нітридною зоною і без неї, залежно від температури, тиску, складу середовища, що насичує (табл. 2, табл. 3), та розміру температурних циклів (рис. 1). При азотуванні в тліючому розряді досягається висока твердість поверхні титанових сплавів – до 10000 МПа, але при цьому різко зменшується пластичність азотованих шарів і на 30 % зменшується границя міцності при розтязі матеріалу (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив температури вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі на механічні властивості титанових сплавів

Сплав	t_H, ^0C	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$h_Д$, мкм
		Н/мм^2		%		
ВТ1- 0	500	1340	1025	8	13,0	80
	550	1340	1035	9	16,0	95
	600	1330	1030	9	16,5	115
	700	1010	890	4	6	
	900	1050	990	3,5	5,9	
	гартування + старіння	1335	1030	10	22	
ВТ1 - 00	500	1355	1050	9	16	90
	550	1360	1060	10	17	105
	600	1355	1050	10	17	130
	700	1060	930	5	8	
	900	1085	950	4	7	
	гартування + старіння	1355	1060	12	25	

Джерело: розроблено аторами

Дослідження показало, що при термоциклічній обробці збільшується швидкість дифузії за рахунок імпульсного впливу на поверхню іонами суміші робочих газів. Проводилася обробка зразків різними режимами термоциклів (0, 20, 50, 100)°С, результати показані на рис. 1.



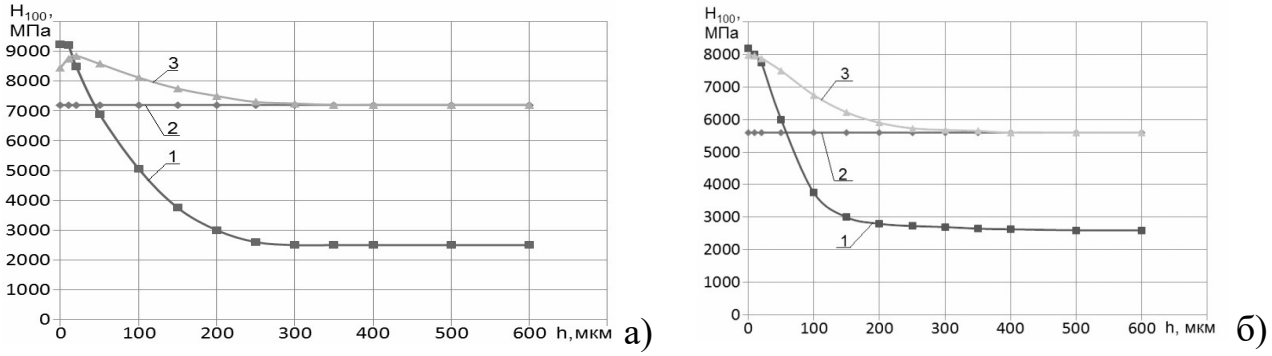
1 – ізотермічний режим; 2 – цикл ± 20°С; 3 – цикл ± 50°С; 4–цикл ± 100°С

Рисунок 1 – Вплив тривалості циклів на глибину дифузійного шару
Джерело: розроблено авторами

Дослідженнями встановлено, що твердість модифікованого шару досягає високих значень за глибиною при обробці методом йонноплазмового термоциклічного азотування в режимі циклування ± 50°С. Мінімальні значення твердості мали зразки, опрацьовані в ізотермічному режимі (цикл дорівнює 0°С).При дослідженні мікротвердості зразків, зміцнених методом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі, було виявлено її збільшення до 10000 МПа і поступове зменшення до 3500 МПа на глибині до 300 мкм (рис. 1).

Отримані значення мікротвердості в 2,5...3,0 рази більше, ніж у просто термооброблених (загартування при 870...890°С у маслі, відпуск при 510...570°С) зразків (рис. 2).

Залежність зміни глибини азотованого шару від температури азотування титанових сплавів наведено на рис. 3.



1 – вакуумне іонне азотування в імпульсному режимі; 2 – гартування; 3 – нітрогартування

Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості від поверхні по глибині титанових сплавів ВТ1-0 (а) і ВТ1-00 (б)
Джерело: розроблено авторами

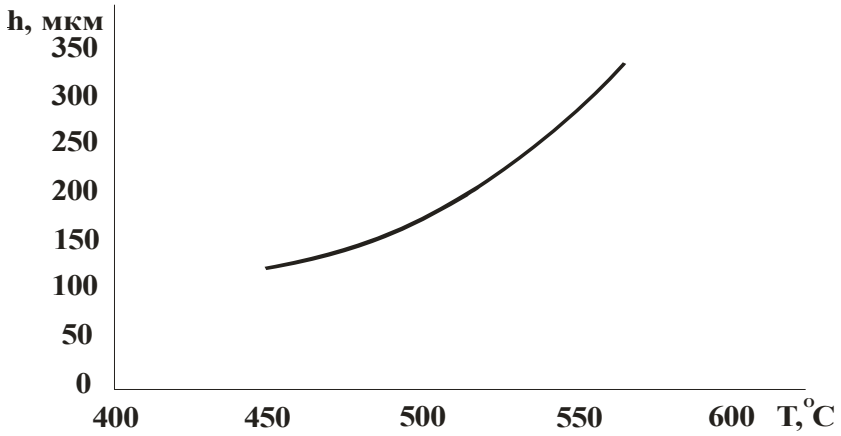


Рисунок 3 – Залежність глибини азотованого шару від температури насичення титанових сплавів тривалістю 8 годин

Джерело: розроблено авторами

Дослідження титанового сплаву зі зміцненим азотованим шаром дозволили отримати експериментальні результати щодо визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на мікротвердість.

За рахунок зміни параметрів процесу вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі (температури, тиску, складу насичуючого середовища і часу азотування) можна змінювати фізико-механічні характеристики, структуру, товщину, фазовий і хімічні склади поверхневого азотованого шару в значних межах, а саме: мікротвердість поверхні до 10000 МПа; товщину азотованого шару до 500 мкм; товщину нітридного шару до 25 мкм; різне співвідношення фаз TiN, Ti_2N, $Ti_\alpha(N)$; різний градієнт твердості по глибині, що дозволяє оптимізувати властивості поверхневого шару в конкретних умовах експлуатації.

Висновки:

1. Величина мікротвердості залежить від фазового складу поверхні. На поверхні сплаву ВТ1-0 після азотування утворюються три фази TiN, Ti_2N і $Ti_\alpha(N)$. Твердість поверхневого шару азотованого титану залежить від співвідношення цих фаз і тим вища, чим більша кількість фази TiN. Найвищу твердість має фаза TiN, меншу – Ti_2N. Твердість зони внутрішнього азотування ($Ti_\alpha(N)$) змінюється в залежності від концентрації в ній азоту.

2. За рахунок зміни параметрів процесу вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі (температури, тиску, складу насичуючого середовища і часу азотування) можна змінювати фізико-механічні характеристики (глибину дифузійного шару до 300 мкм, мікротвердість до 9600 МПа, різний градієнт твердості по глибині, фазовий склад азотованих поверхонь і т.д.), отримувати поверхневі шари з різним фазовим складом (α, γ' та ε - фази) із нітридною зоною і без неї, залежно від температури, тиску, складу середовища, що насичує, та розміру температурних циклів, що дозволяє оптимізувати властивості поверхневого шару в конкретних умовах експлуатації.

3. Збільшення часу азотування титанових сплавів сприяє збільшенню товщини азотованого шару до 300 мкм. Додавання в насичуюче середовище інертних газів гелію і аргону сприяє збільшенню пластичності та товщини азотованого шару.

Список літератури

1. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γTiAl for improved mechanical properties (Поліпшення механічних властивостей сплаву γTiAl шляхом модифікації). *Scr. met. Et mater*. 1994. 31, №7. P. 829–833.
2. Гогаєв К.О., Радченко О.К. Деформування титанових сплавів прокатуванням. *Металознавство та обробка металів.* 2001. №4. С. 25–29.
3. Шалапко Ю.І., Гончаров В.В. Підвищення антифрикційних властивостей титанового сплаву ОТ4 при лазерному опромінюванні поверхні. *Вісн. Технол. ун-ту Поділля*. 1999. № 6. С. 177–178.
4. Yue T.M., Cheung T.M., Man H.C. The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. J. Mater. *Sci. Lett.* 2000. 19, №3. P. 205–208.
5. Gurrappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834 (Вплив алюмінування на окислення титанового сплаву IMI 834). *Oxid. Metals*. 2001. 56, №1-2. P. 73–87.
6. Федірко В., Яськів О., Притула А. Азотування і борування титанових сплавів – перспективи комбінованого оброблення. *Машинознавство*. 2003. №4. С. 23–26.
7. Федорак Р.М. Дифузійне залізнення та цементація титану. *Металознавство та обробка металів*. 1998. №4. С. 52–55.
8. Рутковський А. В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2022. Вип. 6(37), ч. І. С. 3–9
9. Рутковський А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 72–81.

Referencis

1. Nazmy, M. & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γTiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater*, *31*, 7, 829–833 [in English].
2. Hohaiev, K.O. & Radchenko, O.K. (2001). Deformuvannia tytanovykh splaviv prokatuvanniam [Deformation of titanium alloys by rolling]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal processing*, *4*, 25–29 [in Ukrainian]
3. Shalapko, Yu.I., Honcharov, V.V. (1999). Pidvyshchennia antyfryktsiinykh vlastyvostei tytanovoho splavu OT4 pry lazernomu oprominiuvanni poverkhni [Increasing the antifriction properties of the OT4 titanium alloy during laser irradiation of the surface]. *Visn. Tekhnol. un-tu Podillia*. *– Visn. Technol. Podillia University, 6*, 177–178 [in Ukrainian]
4. Yue, T.M., Cheung, T.M. & Man, H.C. (2000). The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *J. Mater. Sci. Lett*, *19, 3,* 205–208 [in English].
5. Gurrappa I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxid. Metals*, 56, 1-2, 73–87 [in English].
6. Fedirko, V., Yaskiv, O. & Prytula, A. (2003). Azotuvannia i boruvannia tytanovykh splaviv – perspektyvy kombinovanoho obroblennia [Nitriding and boronizing of titanium alloys – prospects for combined processing]. *Mashynoznavstvo – Mechanical science, 4,* 23–26. [in Ukrainian]
7. Fedorak, R.M. (1998). Dyfuziine zaliznennia ta tsementatsiia tytanu [Diffusion fertilization and cementation of titanium]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal processing, 4*, 52–55 [in Ukrainian]
8. Rutkovskyi, A. V., Markovych, S.I. & Mykhailiuta, S.S. (2022). Analiz napruzheno-deformovanoho stanu ionnoazotovanykh zrazkiv iz pokryttiam v umovakh izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti [Analysis of the stress-strain state of ion-nitrogenized coated samples under isothermal and thermocyclic creep conditions]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, *Issue 6(37),* 3–9 [in Ukrainian]
9. Rutkovskyi, A.V., Markovych, S.I. & Mykhailiuta, S.S. (2020). Teplostiikist ionnoazotovanykh aliuminiievykh splaviv pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu vplyvi [Heat resistance of ion-nitrogenized aluminum alloys under isothermal and thermocyclic exposure]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, *Issue 3(34),* 72–81. [in Ukrainian]

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher
National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine
Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci, **Sergiy Magopec,** Assos. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Markovych**
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Research on the Dependence of the Microhardness of Modified Surfaces of Titanium Alloys on the Depth of Nitrogen Saturation During Vacuum Ion Plasma Nitriding in the Thermocyclic Mode

A study of titanium alloys with a strengthened nitrided layer by the method of vacuum ion plasma nitriding in thermocyclic mode was carried out to determine the regularity of the effect of diffusion saturation parameters on microhardness. At the same time, the effect of anomalous mass transfer of nitrogen in the surface of the part being processed was used, by creating a field of thermal stresses in the surface layer due to the cyclic inclusion and exclusion of the glow discharge and cyclic temperature changes.

Microhardness studies of strengthened surface layers were carried out on metallographic slides using a PMT-3M microhardness meter, the thickness of the nitride layer was controlled using microstructural analysis using a MIM-10 microscope, and the phase composition of the surface layer was monitored using a DRON-3M device.

Vacuum ionic nitriding in the thermocyclic regime of titanium alloys allows changing the physical and mechanical characteristics within wide limits (diffusion layer depth up to 500 μm, microhardness up to 9600 MPa, phase composition of nitrided surfaces, etc.), obtaining surface layers with different phase composition (α , γ' and ε - phases) with and without the nitride zone, depending on the temperature, pressure, composition of the saturating medium, and the size of the temperature cycles. Nitriding in a glow discharge achieves a high hardness of the surface of titanium alloys – up to 10,000 MPa, but at the same time the plasticity of the nitrided layers is sharply reduced and the tensile strength of the material is reduced by 30%.

Conclusions. 1. The amount of microhardness depends on the phase composition of the surface. Three phases TiN, Ti2N and Tiα(N) are formed on the surface of the VT1-0 alloy after nitriding. The hardness of the surface layer of nitrided titanium depends on the ratio of these phases and is higher, the greater the amount of the TiN phase. The TiN phase has the highest hardness, the Ti2N phase has the lowest hardness. The hardness of the internal nitriding zone (Tiα(N)) varies depending on the concentration of nitrogen in it.

2. By changing the parameters of the vacuum ion nitriding process in the pulse mode (temperature, pressure, composition of the saturating medium and nitriding time), it is possible to change the physical and mechanical characteristics (diffusion layer depth up to 300 μm, microhardness up to 9600 MPa, different hardness gradient along the depth , phase composition of nitrided surfaces, etc.), obtain surface layers with different phase composition (α, γ' and ε - phases) with and without a nitride zone, depending on temperature, pressure, composition of the saturating medium, and size temperature cycles, which allows to optimize the properties of the surface layer in specific operating conditions.

3. Increasing the nitriding time of titanium alloys contributes to increasing the thickness of the nitrided layer to 300 microns. Addition of inert helium and argon gases to the saturating medium helps to increase the plasticity and thickness of the nitrided layer.

titanium alloys, modified surface, nitriding, microhardness

Одержано (Received) 14.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 23.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.312.012.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.271-284

М.І. Денисенко, доц., канд.техн. наук
ВСП «Немішаївський фаховий коледж НУБіП України», м. Київ, Україна
e-mail:mdenisenko317@gmail.com

Відновлення та зміцнення деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, працюючих в абразивному середовищі

В теперішній час, в агропромисловому комплексі підприємства зазнають економічних втрат від абразивного зносу деталей і робочих органів ґрунтобробної техніки, кормозбиральних та посівних машин. Деталі і робочі органи сільськогосподарських машин працюють у важко навантажених умовах, контактують своїми робочими поверхнями не тільки з абразивною масою і мастилом, але й безпосередньо з зовнішнім середовищем, при цьому частіше всього зазнаючи зміні температур, що призводить до їх підвищеного зносу та скорочення термінів технічної експлуатації машин. Абразивне зношування і пошкодження – найбільш розповсюджені та інтенсивні види руйнування ґрунтообробних, посівних та садильних машин, обладнання для тваринництва і виробництва кормів.

Щорічно сільське господарство України витрачає на підтримання техніки у справному стані більше 17-20 млрд. грн. Науково-дослідні установи та виробники сільськогосподарської техніки проводять роботи по створенню і вдосконаленню прогресивних та інноваційних технологій для відновлення і зміцнення їх деталей робочих органів.

леміш плуга, молоток кормодробарки, абразивне зношування, точкове зміцнення, композитний матеріал, пластинка твердого сплаву

Постановка проблеми. Агропромисловий комплекс України займає провідне місце у національній економіці, забезпечуючи до третини промислового виробництва країни та до 40% її експортних прибутків. Розвиток агропромислового комплексу, а також підвищення продуктивності праці і працездатності машин стримується значним абразивним спрацюванням їх деталей, робочих органів та механізмів. Зношування деталей є процесами руйнування їх поверхневого шару при терті, за якого змінюються розміри, маса деталі, її геометрична форма (наприклад, утворюються овальність, конусність, округлення прямих кутів), і мікрогеометричні параметри (шорсткість поверхні). Під впливом сил тертя і динамічних факторів (вібрації, ударних навантажень) та природніх процесів (старіння матеріалів) відбуваються структурні та фізико-хімічні зміни у матеріалі деталі, утворюються поверхневі напруження, що призводить до мікротріщин, кристалічна решітка ущільнюється. У промисловості і агропромисловому комплексі витрачаються сотні тисяч тон металу та велика кількість людської праці на виготовлення запасних частин і заміну швидкозношуваних деталей.

При цьому, внаслідок заміни спрацьованих деталей, зменшується продуктивність машин і механізмів, зростають простої агрегатів та виробничих ліній. На сьогодні, коли обладнання багатьох підприємств, значно спрацьовано, а засоби для його заміни, найближчим часом, обмежені, підвищення зносостійкості та збільшення терміну служби машин потребують постійної уваги, зокрема: раціонального конструювання, створення відповідних умов експлуатації, вибору матеріалу, з якого виготовляється деталь, обгрунтування технології або методу відновлення чи зміцнення.

© М.І. Денисенко, 2023

Асортимент виробів та деталей машин агропромислового комплексу охоплює всю програму, близько 10 тисяч видів, що швидко зношуються, для всіх сучасних сільськогосподарських машин та ґрунтообробної техніки. На практиці використовуються багаточисленні методи покращення властивостей матеріалів в залежності від конкретних умов експлуатації, наприклад, різновиди термічної і хіміко-термічної обробки поверхневих шарів, використання біметалевих конструкцій, методи наплавлення металів і твердих сплавів, нанесення тонких шарів методами напилювання і металізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При зношуванні деталей сільськогосподарських машин переважають процеси абразивного спрацювання декількох різновидів. Більшість деталей робочих органів спрацьовуються у контакті з ґрунтами, мінеральними добривами, рослинною масою і таке інше.

При обробці твердих ґрунтів з каменистими домішками спостерігається значна деформація ріжучої кромки і втомні вищербини. Працездатність ґрунтообробних машин визначається доремонтним ресурсом робочих органів, тому його підвищення дуже актуально. В результаті інтенсивного абразивного спрацювання змінюються геометрія ріжучої кромки і леза та загальні розміри робочих органів, що є причиною порушення агротехнічних вимог, зниження якості обробки ґрунту, суттєве підвищення енерговитрат.

Процеси абразивного зношування одночасно визначаються видом руйнування поверхневого шару та знеміцнювання матеріалу. При заданих умовах абразивного впливу, у даному матеріалі протікає певний процес зношування, але в різних матеріалах процеси спрацювання можуть бути різними. Зміна умов експлуатації машин в деяких межах не супроводжується зміною процесу зношування, а впливає тільки на його інтенсивність. Зношування є самоналагоджувальним процесом, тому що залежить від зовнішніх умов і властивостей зношуваного матеріалу, від реакції кожного матеріалу на механічний вплив абразивних часток, а також від характеру його взаємодії з зовнішнім середовищем.

У створених моделях абразивного зносу відрізняють ковзання деталі по монолітному абразиву, вільному абразиву у насипному стані, удари по монолітному або вільному абразиву, гідро- і газоабразивне зношування, та різні взаємодії контактуючих тіл з абразивними частками, що знаходяться у контакті. Складність і нестаціонарність процесу, його випадковий характер не дозволили створити загальну теорію абразивного зношування. Але в цілях вирішення практичних завдань накопичено багато експериментального матеріалу по впливу різних факторів на зносостійкість. В залежності від того, як зв’язані абразивні частки зі спряженими тілами, розрізняють три види абразивного зношування:

1. Зношування твердими частками, нерухомо закріпленими на поверхні тертя одного зі спряжених тіл. Це тверді структурні складові матеріалу одного з елементів пари тертя, частинки абразивної шкірки, брусків та іншого інструменту, частинки нагару на стінках циліндра двигуна внутрішнього згоряння;

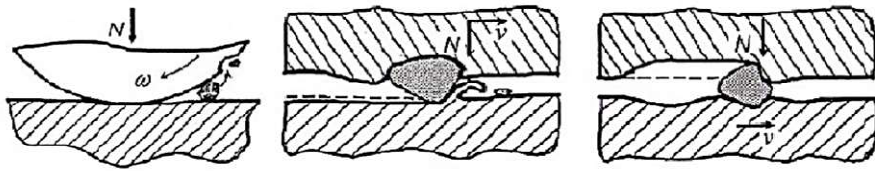
2. Зношування вільними частинками, що потрапляють у зону контакту тіл тертя (оксиди металів, наклепані частинки зносу, фрагменти стружки, тверді частинки у мастилі і зовнішньому середовищі);

3. Зношування незакріпленими частинками, що передають тиск деформованої маси (абразивні частки у ґрунті, гірських породах, насипних вантажах при їх транспортуванні).

Зношування металів в масі абразивних часток відбуваються у вузлах тертя сільськогосподарської техніки (диски борін, ножі і лемеші ґрунтообробних машин,

молотки кормодробарок, ножі і шнеки збиральних комбайнів), долота бурильних установок, ковші екскаваторів, платформи для насипних вантажів і т. ін. Частинки абразиву, що потрапляють у зону контакту, не встигають впровадитися у об'єм одного з тіл тертя на потрібну глибину, руйнуються подібно мікровибуху (рис.1, а). Утворені при цьому уламки частинок, маючи високу швидкість, пластично деформують поверхневий шар деталі або крихко руйнують його.

При навантаженнях, менших ніж зусилля руйнування частинок, відбувається їх впровадження (шаржування) у менш твердий матеріал (верхнє тіло на рис 1, б), і процес зношування визначається умовами шаржування і властивостями того тіла, твердість якого вища. При цьому можливі два типи руйнування поверхонь деталей. Якщо зусилля, що зсовує абразивну частку, менше критичного, за якого було би можливе його переміщення, то реалізується тертя закріпленого абразиву по більш твердому матеріалу, і абразивне зношування останнього (рис.1, б).



а б в

Рисунок 1 – Механізми зношування деталей вільними абразивними частками

Джерело: розроблено атором

Поверхня тертя більш твердої деталі покривається поздовжніми канавками малої глибини. Якщо зусилля, що зсовує частинку абразиву, більше критичного, то відбувається її переміщення у більш м'якому матеріалі, і він зазнає інтенсивного пластичного відтиснення (рис.1, в). Зношена поверхня має глибокі канавки, витягнуті вздовж напрямку ковзання.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є підвищення технічного ресурсу і працездатності машин агропромислового комплексу шляхом вдосконалення та розробки інноваційних технологій відновлення і зміцнення поверхонь тертя – технологій інженерії поверхонь.

Виклад основного матеріалу. Підвищення довговічності деталей і робочих органів машин є складним завданням, наукові основи якого розроблені недостатньо аргументовано і значно слабші, ніж основи забезпечення поверхневої міцності. Аналіз завдань в царині підвищення зносостійкості деталей і робочих органів машин переконує у недостатності рішень, заснованих тільки на виборі матеріалів з підвищеною зносостійкістю: таким чи іншим методом можливо лише зменшити швидкість зношування, але не керувати самими процесами тертя і спрацювання і, що особливо важливо, тими змінами технічного стану і працездатності деталей, причиною яких є знос поверхонь тертя.

Одним з резервів збільшення технічного ресурсу і довговічності даних деталей сільськогосподарської техніки треба вважати різноманітні методи їх зміцнення на стадіях як виробництва, так і експлуатації при відновленні. У теперішній час розроблено близько 120 різних методів зміцнення та відновлення деталей машин. Внаслідок технологічної спадковості при виготовленні деталей, і релаксаційних процесів за їх експлуатації, відбуваються зміни хімічних та фізико-механічних властивостей металу поверхневого шару. Підвищення ресурсу та зменшення втрат на тертя відноситься до пріоритетного напрямку розвитку сучасних машин.

Інженерія поверхні («surface engineering») належить до одного з нових напрямків у науці і технології, що включає традиційні та інноваційні процеси модифікування поверхні деталей машин, і створюють на ній композиційні матеріали з властивостями, що відрізняються від властивостей основного матеріалу. Методи інженерії поверхні включають у себе як нанесення на робочу поверхню покриттів з іншого матеріалу (електрохімічне осадження, іонне азотування, високошвидкісне напилювання HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), електроіскрове легування, лазерне наплавлення, мобільна газополуменева металізація, детонаційне і газополум'яне напилювання, та інш.) так і зміна властивостей поверхневого шару – зміна його структурно-фазового стану, до яких можливо віднести іонну імплантацію, кріогенні методи, мікродугове оксидування, трибомеханічна обробка.

Дані виробничих досліджень, розроблених з крупнозернистим карбідом вольфраму, матеріалів для ручного електродугового наплавлення, показали, що в самих важких умовах використання розрихлювачів доцільно армувати твердосплавними наконечниками. Найбільшу зносостійкість у суглинистих грунтах мають наплавлені шари складу Fe – C- Cr – Si – Mo – Nb – W і Fe – C – Mn – B. Дослідники шляхом швидкісного СВЧ – борування на поверхнях деталей сільськогосподарської техніки, типу лап культиваторів, виготовлених зі сталі 65Г, отримали композиційні боровані покриття системи $Fe_n B$ – Fe – B. Леза робочих органів сільськогосподарської техніки у процесі експлуатації внаслідок абразивного зносу втрачають свою працездатність, і тому їх необхідно відновлювати, тобто підвищувати довговічність.

З урахуванням природи зносу, наявність на більшості робочих органів сільськогосподарських машин ріжучої крайки, а також необхідність збереження заданої геометрії і розмірів – їх зміцнення, захист від небезпечного впливу оброблюваних матеріалів, і факторів зовнішнього середовища завжди є актуальними завданнями. Пропонується спосіб відновлення робочої поверхні методом плазмового зміцнення твердими сплавами «Сормайт» або електродуговим наплавленням електродами марки Т-590 – НГ. В даній роботі для зміцнення і відновлення деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки використані наступні інноваційні технології: газополуменеве напилювання з оплавленням, електроіскрове легування зразків з конструкційної сталі 65Г, мікроплазмова обробка порошковим дротом ПП-АН 148, дугове точкове зварювання (ДТЗ) порошковим – дротом – плавким електродом, відкритою дугою порошковим дротом ПП – АН 170 (ПП – АН 170М); детонаційне напилювання покриття нітриду титану (TiN), використання безвольфрамових композиційних порошкових матеріалів, лазерне зміцнення [3, 4, 9].

Мікроплазмове зміцнення робочих крайок деталі здійснювали на установці МПУ-4: режими мікроплазмової обробки, наступні: сила струму – 55–60А, температура у зоні горіння аргонової дуги – близько 5000 °С. Плазмоутворюючий газ – аргон, а захисний – аргон, гелій або їх суміші. Електроіскрове легування (ЕІЛ) зразків з конструкційної сталі 65Г проводили на установці ЕЛІТРОН-22, в атмосфері повітря за режимом: величина електричного струму – 0,5–2,8 А, час обробки – 5 хв. Випробування здійснювали на установці за схемою Брінеля-Хаворта, в якості покриття – матеріали ТН20 і ВК6. Лазерне зміцнення деталей здійснювали на установці «Квант-16» і на газовому лазері CO_2 «Лотос-31»: глибина зміцнення 0,5…0,6 мм.

В якості абразивного матеріалу використовували кварцевий пісок та карбід бору зернистістю 500 мкм.

Визначаючим у виборі технології електроіскрового легування є його суттєві переваги:

– не потребує спеціальної підготовки поверхонь, необхідно лише повністю очистити їх від бруду і повністю видалити сліди жиру і масла;

– забезпечують високу міцність зчеплення шару покриття з основним матеріалом;

– не впливає на основну структуру металу;

– надає шарам поверхні покриття потрібні експлуатаційні характеристики;

– підвищує стійкість зміцнених інструментів в 2–3 рази;

– дозволяє економити високовартісні інструментальні сталі;

– дозволяє використовувати в якості легуючих матеріалів як чисті метали, так і багато сплавів: металокерамічні, композиційні, тугоплавкі з'єднання і т.п.;

– виключає нагрів або допускає незначний нагрів обробленої поверхні в процесі легування, який не може змінити її геометрію і фізико-механічні властивості;

– відрізняється простотою технологічного процесу, малогабаритністю і транспортабельністю обладнання.

В якості електродних матеріалів були вибрані тверді сплави ВК6 і ТН20, які рекомендуються авторами [4, 6], для нанесення зносостійких покриттів.

Результати досліджень, що подані на рис. 2, свідчать про те, що електроіскрове легування конструкційної сталі 65Г суттєво впливає на її зносостійкість в умовах абразивного зношування.

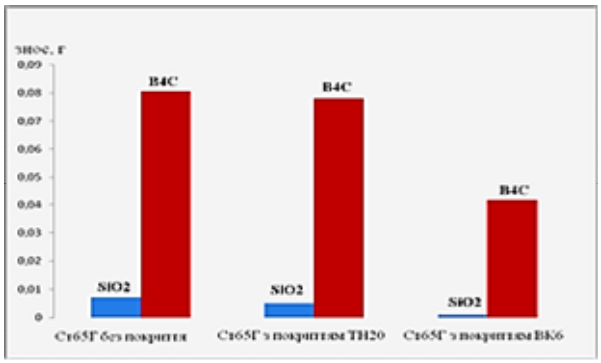
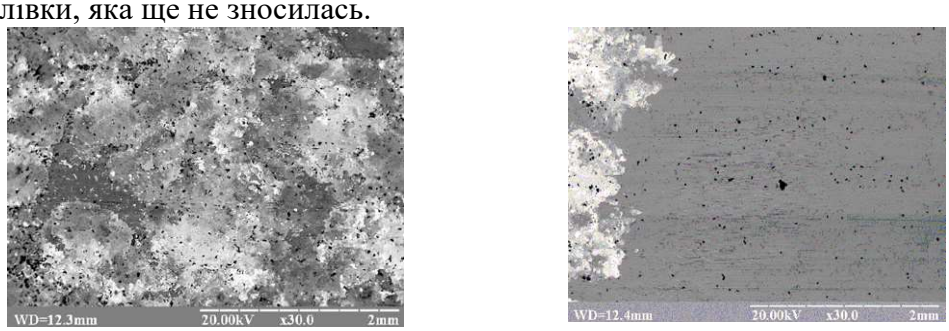


Рисунок 2 – Залежність зносу сталі 65Г з покриттями (ТН20 і ВК6) від твердості абразиву

Джерело: розроблено атором

При випробуванні в середовищі кварцевого піску зернистістю 500 мкм, покриття з твердого сплаву ВК6 показує дуже малий знос в порівнянні з ТН20. В середовищі карбіду бору інтенсивність зношування сталі 65Г значно зростає (рис. 2). На робочій поверхні (рис. 3) спостерігається повне видалення покриття і занурення твердих частинок карбідів у металеву поверхню. У деяких місцях спостерігаються залишки оксидної плівки, яка ще не зносилась.



а б

Рисунок 3 – Топографія робочої поверхні сталі 65Г після випробування у середовищі кварцового піску зернистістю 500 мкм (а) і середовищі карбіду бору B_4C (б)

Джерело: розроблено атором

Особливістю ЕІЛ є неможливість отримання покриттів великої товщини. Проаналізувавши науково-дослідницькі роботи, можливо стверджувати, що максимальна товщина електроіскрового покриття залежить, головним чином, від величини енергії імпульсів струму, питомого часу обробки, газового середовища і матеріалів електродів. Розвитку методу ЕІЛ сприяють також роботи Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (м. Київ), Інституту прикладної фізики АН Молдови (м. Кишинів), багатьох університетів і крупних фірм таких країн, як Німеччина, Японія, США, Індія, Південна Корея, Китай. У процесі роботи робочі органи сільськогосподарських машин зазнають абразивно-корозійного зносу та ударного навантаження, тому їх терміни служби часто не перевищують одного сезону.

Газополум'яні методи нанесення зносостійких покриттів вже багато років широко використовуються для захисту швидкозношуваних деталей, як в Україні, так і за кордоном. Фірма MWS (Німеччина), розробляє і виготовляє інструменти і нове обладнання для виготовлення ножів для соломорізок, косарок, подрібнювачів, кормороздавачів. Для нанесення зміцнюючих покриттів використовуються методи газополуменевого напилення з оплавленням, що включає у себе дротове, порошкове та шнурове напилення, а також плазмове і лазерне порошкове наплавлення. Серійні диски борін з пружинної сталі 65Г – це швидкозношувані деталі ґрунтообробної та посівної техніки. За технічної експлуатації, трапляються випадки зламу дисків борін – 50%, які визиваються раптовим переходом від потовщеної площини до більш тонкої поверхні.

Основні складові газополум'яного методу з оплавленням: підготовка поверхні, газополум'яне напилювання зносостійкого покриття експериментального складу, оплавлення поверхні. Покриття на лезо робочого органу наноситься даним методом (рис. 4): суть процесу газополум'яного напилювання полягає у формуванні на поверхні леза шару покриття з частинок напиленого матеріалу, маючи запас теплової і кінетичної енергії. Покриття отримуємо в результаті взаємодії зі струменем газового полум'я, котрий утворюється при згоранні суміші кисень – горючий газ (ацетилен, пропан). Порошок доводять до рідкого або пластичного стану, і його частки набувають швидкості 30–40 м/с та осідають на поверхні зміцнення.

Газополум'яне напилювання здійснюється за температури 2000º С, твердість поверхні після зміцнення 68…70 HRC, товщина покриття, n=1,0 – 1,2 – 1,5 мм; ширина покриття – 20,0 мм. Створення нового покоління зміцнюючих технологій, на прикладі дискових робочих органів, сприяє більш ефективному використанню твердосплавних покриттів, що зменшують абразивне тертя з основним металом загартованої поверхні деталі за рахунок нанесення покриття експериментального складу, що забезпечують граничний рівень напружень в активному шарі ґрунту у напрямку його переміщення.

Можна припустити, що зносостійке покриття нанесено методом газополум'яного напилення з оплавленням, містить у своєму хімічному складі близько 50% карбіду вольфраму. Твердий сплав – це двофазний матеріал, отриманий методами порошкової металургії, котрий складається з фази твердого матеріалу і фази зв'язуючого металу.

Покриття при точно витриманій температурі, активно спікається з ріжучою крайкою (лезом) ножа, диска або іншого робочого органу машини. Карбідне покриття з впровадженим у нього твердосплавним матеріалом захищає ріжучу крайку від зносу і утворює ділянку ножового леза та забезпечує «ефект самозагострювання» (рис.5, рис.6).

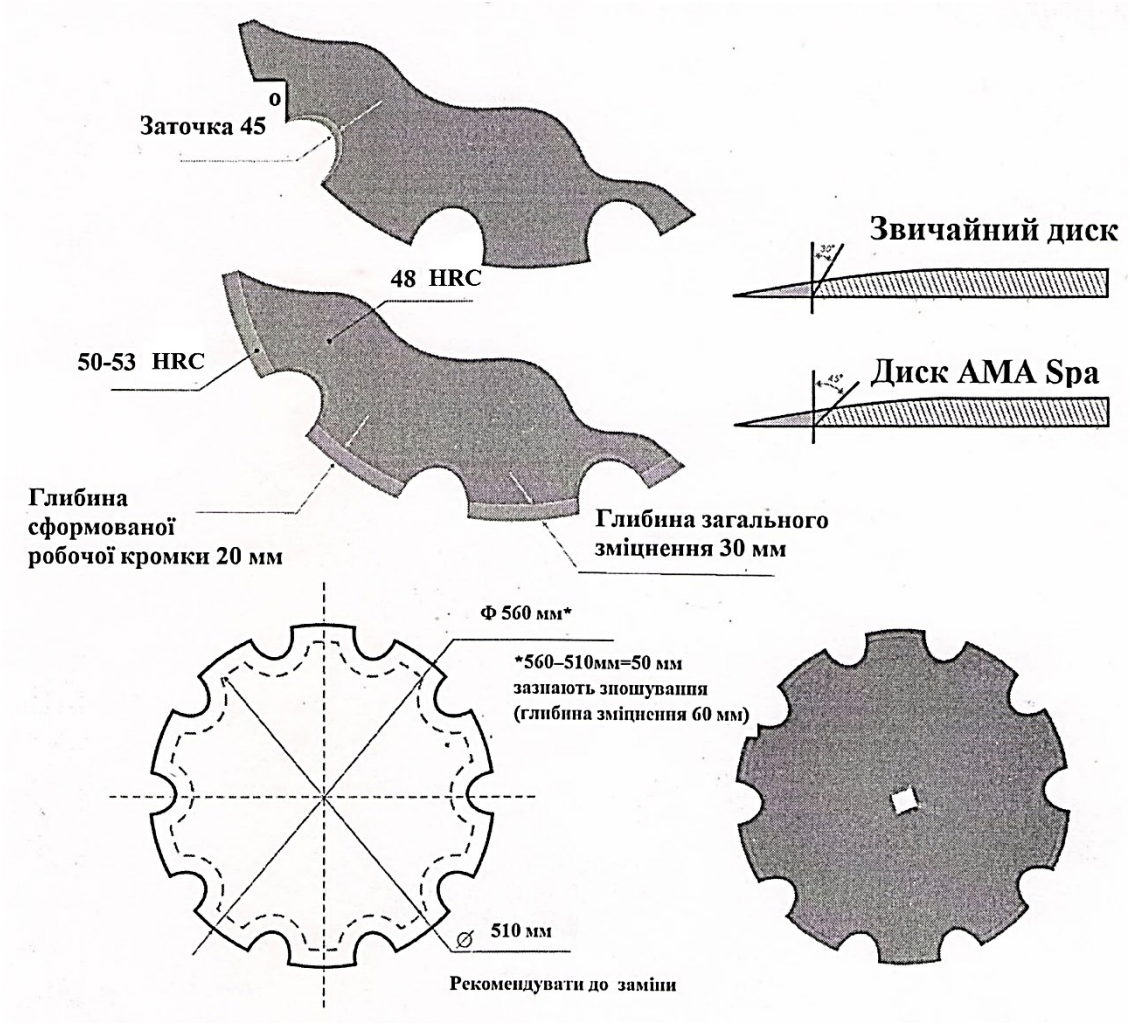


Рисунок 4 – Застосування експериментальних дисків борін:
⌀ 410-450 мм посівні комплекси (турбодиски), ⌀ 610 мм «рівний», «ромашка» «JOHN DEERE», ⌀ 460 мм «рівний», «ромашка», «AMAZONE CATROS», ⌀ 620 мм (5 болтів) «ромашка», «LEMKEN RUBIN», ⌀560 мм «ромашка» БДМ, ⌀ 660 мм «рівний», «ромашка» БДТ, ⌀ 610 мм «рівний», «SANFLOWER», ⌀ 660 мм «ромашка» (6 мм; 8 мм) «GRIZZLY», ⌀ 610 мм «рівний», «ромашка», «SALFORD», ⌀ 660 мм «ромашка», «GREGOIRE BESSON»

Джерело: розроблено атором

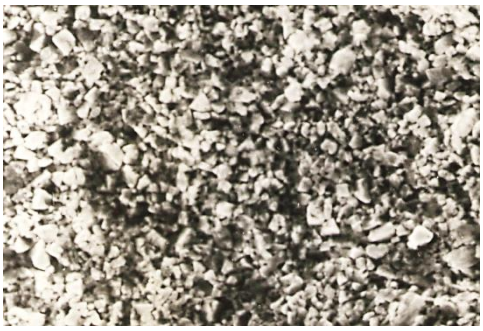


Рисунок 5 – Поверхня тертя твердого сплаву ВК-8, 1000
Джерело: розроблено атором

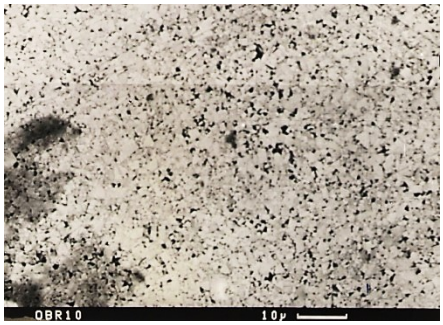


Рисунок 6 – Вихідна поверхня, твердий сплав ВК-8
Джерело: розроблено атором

Рентгеноструктурні дослідження поверхні тертя твердого сплаву ВК-6 (ВК-8) вольфрамової групи з вмістом Со до 20% і більше показали, що зовнішні впливи абразивного середовища призводять до зміни у (Со – фазі) – відбувається частковий перехід кубічної модифікації у гексагональну. При цьому, частка гексагональної модифікації у (Со-фазі) поверхневого шару спрацьованих твердосплавних пластин підвищується при зростанні ступеня деформації, що утворюється при виконанні певного технологічного процесу. Відомо, що зростання гексагональної Со – фази підвищує крихкість твердих сплавів, але, коли ці зміни охоплюють поверхневий шар невеликої товщини, і при цьому не відбувається його розрихлення, можливо вважати, що такі структурні зміни сприяють підвищенню зносостійкості деталей (рис. 5).

В нашій країні випускаються WC – Co твердосплавні пластини з іонно-плазмовими покриттями з TiC і TiN. Вибір даних з'єднань у якості матеріалів зносостійких покриттів можливо пояснити їх задовільними експлуатаційними властивостями, а також впровадженою технологією нанесення покриття. Для деталей, що працюють в умовах абразивного зносу при нормальних температурах, рекомендується наплавлений матеріал наступного складу: C 2,25…4,5%; Si 0,2…0,4%; Mn 0,50…6,0%; Cr 24,0 …35,0%, що має твердість від 48 до 60 HRC, і використовується для наплавлення деталей сільськогосподарських машин.

Здійснювалися спроби використовувати для відновлення та виготовлення дискових робочих органів при подрібненні зерна і соломи алмазовмісткі композиції шляхом детонаційного напилювання нітриду титану TiN. Сумісно зі вченими Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України була розроблена технологічна документація на виготовлення нового дискового робочого органу, оснащеного алмазовмісткими пластинами, проведено зміцнення експериментальних деталей – молотків і дек кормодробарок, штифтів подрібнювача грубих кормів (соломи) методами детонаційного напилення.

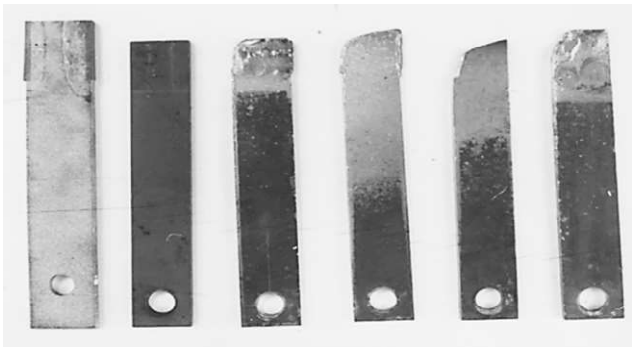
У багатьох технологічних процесах приготування кормів широко використовуються подрібнювачі і дробарки ударної дії компонентів сумішей, зокрема зерна. Молоткові дробарки використовуються у 90% всіх технологічних ліній по приготуванню комбікормів і найбільш повно задовольняють вимогам, що постають перед подрібнювальними машинами, та складають групу високошвидкісних машин ударної дії. Технічна експлуатація таких агрегатів показала, що мінімальний ресурс з усіх деталей і робочих органів мають молотки і ножі, термін служби котрих складає від 72 до 300 годин. Неефективність використання молотків полягає у їх вибраковці, придатних до роботи, або використанню спрацьованих. Для підвищення надійності і довговічності кормоподрібнювачів у роботі здійснили зміцнення робочих крайок молотків деталей робочих органів ударної дії різними методами модифікації поверхні (рис.7).

Механічні впливи мають переважно ударний характер, що є причиною крихкого або втомного руйнування молотка дробарки, але можливе також і абразивне зношування (пил, пісок, абразивні частки).

Мікроплазмове наплавлення зносостійкого покриття, що має такий хімічний склад: 0,85 C; 12,0 Cr; 4 Co; 3,5 V; 1,5 Wo; 2,5 Mo; 0,006 B (рис.8), твердість 58–61HRC. У порівнянні з дротом суцільного перерізу, порошковий дріт забезпечує більш високу продуктивність наплавлення та більші можливості для легування наплавленого металу. Отримане покриття має високу абразивну зносостійкість, а також ударостійкість.

Армування робочих граней молотків дробарок і подрібнювачів комбікормів з недорогої основи (сталь 45, сталь Ст.3) пластинами із твердих сплавів КХЖ–70, КХНФ-15, Х13М2 - Cr_3 C_2 (рис. 9, 10) складається з двох етапів: перший – виготовлення

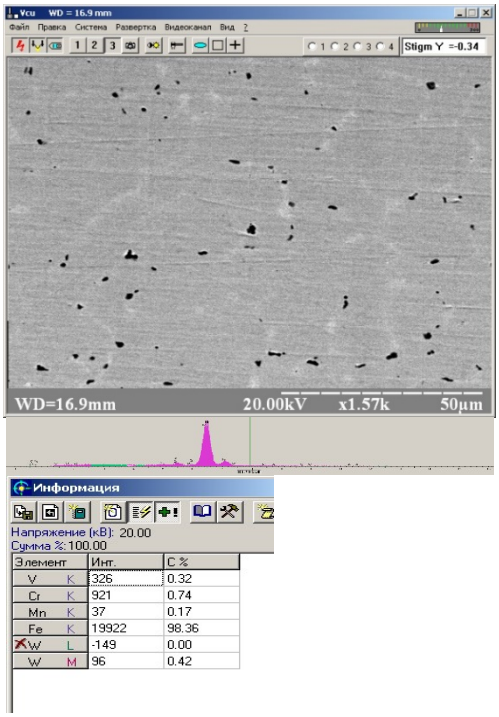
армуючих елементів, другий – паяння (зварювання), наклеювання на корпус-модуль молотка [9].



а б в г д ж

а – армування змінними модульними пластинами (ЗМП); б – серійний, сталь 65Г; в – мікроплазмове зміцнення порошковим дротом ПП-АН148; г – зміцнення твердим сплавом ПГ-С27; д – знос серійного молотка зі сталі 65Г; ж – точкове (крапкове) зміцнення порошковим дротом ПП-АН170

Рисунок 7 – Методи зміцнення крайок робочих органів подрібнювачів комбікормів
Джерело: розроблено атором



..

Рисунок 8 – Поверхня тертя молотка дробарки після зміцнення порошковим дротом ПП-АН148 в умовах вільного абразиву, загальна по всій площі перерізу даного покриття
Джерело: розроблено атором

Модульні пластини виготовляються з наступних матеріалів:

1) порошкові суміші карбіду хрому виробництва Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України;

2) порошок нікелю;

3) порошок заліза, одержаного карбонільним методом, марки Р10;

4) порошок олов'янисто-фосфорної бронзи;
5) модульні пластини з карбідосталі Х13М2 – 30% об. Cr_3C_2.

В результаті детального аналізу нами було вибрано вищий карбід хрому Cr_3C_2, так як відомо, що сплави з його участю мають високу стійкість до корозії у розчинах кислот і лугів. Зразки виготовлялися рідинно-фазним спіканням, суміші порошків сталі Х13М2 і карбіду хрому перед пресуванням зазнають механічної активації. Спікання здійснювали у вакуумі при температурі 1150°С та витримці 1 год. Зі зростанням кількості карбіду хрому у суміші, мікроструктура карбідосталі суттєво змінюється від крупнозернистої до дрібнозернистої, середній розмір карбідної фази становить 6 мкм, металевої фази – 19 мкм. Мікротвердість карбідної складової у карбідосталях на основі Х13М2 змінюється від 7,5 до 14 ГПа. Розкид мікротвердості твердої складової пояснюється утворенням різних типів складних карбідів M_7C_3, $M_{23}C_6$, M_2C (де M-Fe, Cr, Mo) [9].

Порошкові суміші композитних матеріалів виготовляли за стандартною технологією, що прийнята на виробництві сумішей з твердих сплавів на основі карбіду хрому. Пресування пластин здійснювали за тиску 100 МПа у сталевій прес-формі з використанням гідравлічного преса П-125.

Проведені дослідження впливу температури спікання на структуру і властивості зразків карбідосталі Х13М2 – (15-30)% об. Cr_3C_2 дозволило встановити, що використання спікання у вакуумі дає можливість отримати карбідосталі з достатнім рівнем фізико-механічних властивостей.

В карбідах Cr_3C_2 розчиняється 2…2,5% титану, що не зменшує їх мікротвердість. Сплави «хромиста сталь-карбід хрому» зі вмістом карбіду 30% об. має поряд з високою твердістю та зносостійкістю, підвищення характеристики міцності. Таке поєднання властивостей дозволяє рекомендувати їх для виготовлення деталей робочих органів, котрі працюють в умовах ударно-абразивного зношування, зокрема, робочих органів для подрібнення фуражного зерна і приготування комбікормів в умовах вільного абразиву. Загальний вигляд виготовленого експериментального молотка ударної дії, робочі грані котрого армовані модульними змінними пластинами з карбідосталі Х13М2 – (15-30)% об. Cr_3C_2 показано на рис.9.

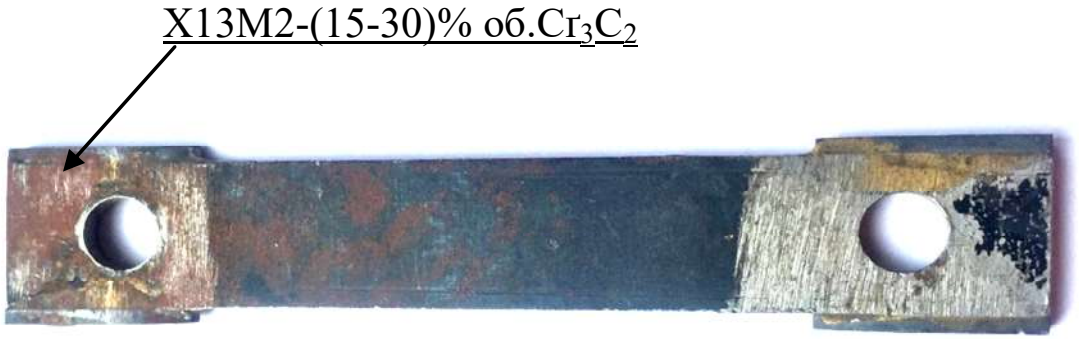


Рисунок 9 – Молоток комбікормової установки БМК-1 з модульними зносостійкими пластинами з карбідосталі

Джерело: розроблено автором

Одним з найважливіших завдань при виготовленні ударних робочих органів подрібнювачів комбікормів є підготовка поверхні модульної пластини для армування основи робочого інструменту, котра в основному визначає надійність кріплення

модульної (змінної) пластини до основи. Модульні пластини кріпилися до основи молотка шляхом склеювання, паяння та аргоно-дугового зварювання. (рис.9, рис.10) Клеї зазнають старіння і тому можуть використовуватися тільки протягом обмеженого періоду часу. На основі результатів досліджень були виготовлені експериментальні партії молотків, армованих шляхом приварювання модульних змінних вставок (пластин) до корпусу молотків зі сталі Ст.3.

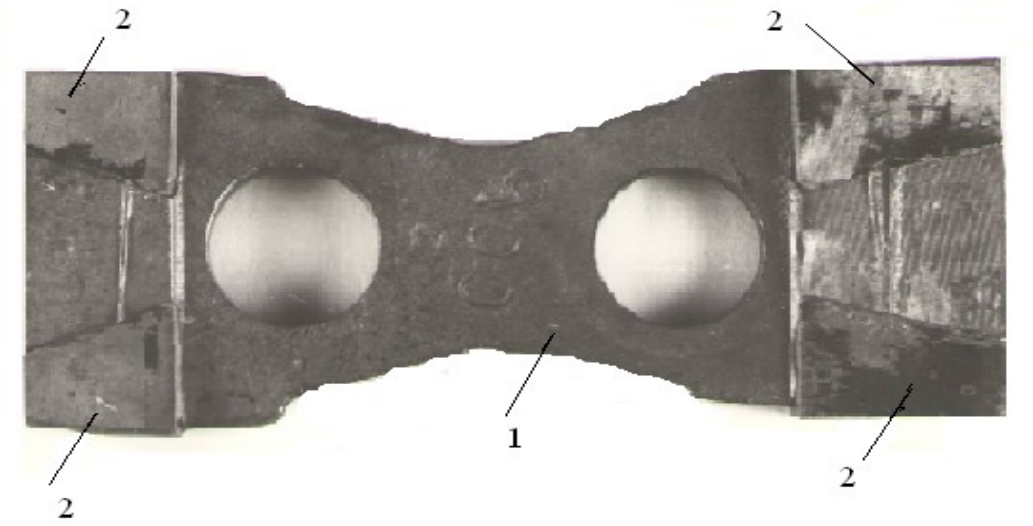


Рисунок 10 – Молоток-модуль (основа 1 – сталь, Ст.3, сталь 45; 2 – модульні змінні пластини з порошкового композитного матеріалу КХЖ70, КХНФ15

Джерело: розроблено атором

Перед виробничими випробуваннями, молотки (ножі) зі вставками (пластинами) зі сплавів КХЖ70, КХНФ15 зазнавали термообробки до отримання середніх значень твердості 84…85 HRA. Виробничі випробування експериментальних деталей здійснювали у господарствах Житомирської та Київської областей України, у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», а також на машинно-випробувальній станції в м. Прієкулі, Латвійська Республіка показали, що за зносостійкістю молотки, армовані модульними змінними пластинами (ЗМП), у 10–13 разів переважають серійні елементи зі загартованої сталі 65Г.

Висновки. Головною особливістю механо-корозійних процесів, за наявності абразивного середовища у зоні контакту, є та обставина, що кисень модифікує поверхню тертя у процесі інтенсивної взаємодії твердих абразивних часток з металевою поверхнею деталі, що обумовлює утворення вторинних структур при безперервному переміщенні абразивних частинок.

Вважати недоцільним використання алмазовмісних композицій для зміцнення робочих органів серійних сільськогосподарських машин у зв’язку з наявністю у кормах механічних домішок і недостатньою міцністю даного типу покриттів.

За наявності абразивного середовища у зоні тертя, процеси пластичної деформації і активації поверхневих шарів різко посилюються, окислення охоплює глибші шари та протікає більш інтенсивніше.

Наявність у наплавленому шарі карбідів тугоплавких металів (NbC, VC, TiC, MoC, WC) підвищує твердість та зносостійкість поверхневого шару, що в свою чергу збільшує терміни служби робочих органів сільськогосподарських машин.

Встановлено, що найбільш високу зносостійкість мають молотки кормоподрібнювачів, зміцнені мікроплазмовим нанесенням зносостійких покриттів порошковим дротом ПП-АН148 (блок-модуль комбікормовий БМКА-1, БМКА-1,5).

Ефективність використання робочих органів машин зі змінними модульними пластинами (ЗМП), виготовлених з порошкових композитних матеріалів, найбільш економічна; довговічність ударних робочих органів машин і обладнання для приготування комбікормів з композитних порошкових матеріалів у 10-13 разів вище, ніж у серійних елементів із загартованої сталі 65Г (дробарка зернова ДБ-5, ДКМ-5, КДУ-2,0).

Завдяки впровадженню технології дугового точкового зварювання, значно збільшено ресурс робочих органів ґрунтообробної техніки та інших деталей сільськогосподарських машин.

Список літератури

1. Бобрицький, В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтобробних машин: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.04 / Київ, 2007. 20 с.
2. Аулін, В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельницький національний університет. Хмельницький, 2015. 36 с.
3. Денисенко М.І., Зазимко О.В., Лабунець В.Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*: *наук.-техн. журнал*. 2016. №1 (70). С.150-153.
4. Денисенко М.І., Рубльов В.І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць КНТУ*. 2011. Вип. 24, ч.2. С.28-35.
5. Денисенко М.І., Опальчук А.С. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ*. 2011. Ч.2. С.201-210.
6. Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу / А.А. Бабінець та ін. *Автоматичне зварювання*. 2020. №10. С.26-33.
7. ДСТУ ISO 6847:2004 (ISO 6847:2000, IDT) Матеріали зварювальні. Наплавлення валка металу шва для хімічного аналізу.
8. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів / М.С. Стороженко та ін. *Автоматичне зварювання*. 2020. №10. С.21-24.
9. Волощенко С.М. Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту : дис. д-ра техн. наук. / Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Київ, 2018. 291 с.

Referencis

1. Bobryts′kyy, V.M. (2007). Pidvyshchennya znosostiykosti rizal′nykh elementiv robochykh orhaniv hruntobrobnykh mashyn [Increasing the wear resistance of the cutting elements of the working bodies of tillage machines]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennya znosostiykosti detaley ta robochykh orhaniv sil′s′kohospodars′koyi tekhniky [Tribophysical basics of increasing the wear resistance of parts and working bodies of agricultural machinery]. *Extended abstract of doctor's thesis.* Khmel′nyts′kyy [in Ukrainian].
3. Denysenko, M.I., Zazymko, O.V. & Labunets, V.F. (2016). Doslidzhennia poverkhon tertia robochykh orhaniv gruntoobrobnykh silskohospodarskykh mashyn [Research of friction surfaces of working bodies of tillage agricultural machinesResearch of friction surfaces of working bodies of tillage agricultural machines]. *Problemy tertia ta znoshuvannia: nauk.-tekhn. Zhurnal – Problems of friction and wear: science and technology. magazine, 1 (70)*,150-153 [in Ukrainian].

4. Denysenko, M.I. & Rubl′ov, V.I. (2011). Pidvyshchennya dovhovichnosti robochykh orhaniv hruntobrobnykh mashyn z vykorystannyam tochkovoho zmitsnennya [Increasing the durability of the working bodies of tillage machines using point strengthening]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia* : *zb. nauk. prats KNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation : Collected Works of KNTU*, *Issue 24, part.2,* 28-35 [in Ukrainian].
5. Denysenko, M.I. & Opal′chuk, A.S. (2011). Znoshuvannya ta pidvyshchennya dovhovichnosti robochykh orhaniv sil′s′kohospodars′kykh mashyn [Wear and tear and increasing the durability of working bodies of agricultural machines]. *Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU*, *part. 2*, 201-210 [in Ukrainian].
6. Babinets, A.A. et al. (2020). Vplyv amplitudy i chastoty kolyvan elektrodnoho drotu pry duhovomu naplavlenni na formuvannia i strukturu naplavlenoho metalu i proplavlennia osnovnoho metalu [The influence of the amplitude and frequency of oscillations of the electrode wire during arc welding on the formation and structure of the deposited metal and the penetration of the base metal]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding ,10,* 26-33 [in Ukrainian].
7. Materialy zvariuvalni. Naplavlennia valka metalu shva dlia khimichnoho analizu. [Welding materials. Welding of a roll of seam metal for chemical analysis.]. (2000). *)DSTU ISO 6847:2004 (ISO 6847:2000, IDT*), Kyiv [in Ukrainian].
8. Storozhenko M.S. et al. (2020). Rozrobka tekhnolohii i materialiv dlia elektroiskrovoho nanesennia pokryttiv z metoiu pidvyshchennia terminu ekspluatatsii i nadiinosti detalei tekhnolohichnoho i enerhetychnoho obladnannia ta instrumentiv [Development of technologies and materials for electrospark coating in order to increase the service life and reliability of parts of technological and energy equipment and tools] . *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding, 10,* 21-24 [in Ukrainian].
9. Voloshchenko, S.M. (2018). Stvorennia naukovykh zasad strukturoutvorennia v vysokomitsnomu chavuni dlia pidvyshchennia znosostiikosti zminnykh detalei silhosptekhniky ta transportu [Creation of scientific foundations of structure formation in high-strength cast iron to increase the wear resistance of variable parts of agricultural machinery and transport] . *Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].

Mykola Denysenko, Assoc. Prof., PhD Tech. Sci.
Nemishayev Vocational College of NUBiP of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Restoration and Strengthening of Parts and Tool of Agricultural Machinery Operating in an Abrasive Environment

The working bodies of tillage agricultural machines (ploughshare, plow shelf, cultivator paw, harrow disc) work in conditions of abrasive operation, shock loads and the impact of external aggressive environment. Their repair is to restore the original size of parts and wear resistance of functional work surfaces. During the operation of tillage machines and units, the working surfaces are subjected to uneven wear, which reduces the life of parts and increases the cost of their replacement and restoration.

The working bodies of tillage agricultural machines (ploughshare, plow shelf, cultivator paw, harrow disc) work in conditions of abrasive operation, shock loads and the impact of external aggressive environment. Their repair is to restore the original size of parts and wear resistance of functional work surfaces. During the operation of tillage machines and units, the working surfaces are subjected to uneven wear, which reduces the life of parts and increases the cost of their replacement and restoration.

The current level of operation of agricultural machinery is characterized by increased speeds and high productivity, which, in turn, leads to increased wear of parts. accordingly, the reliability of the recovered ensure the restorative parts.

Surfacing makes it possible to obtain layers of any thickness and chemical composition on the working surfaces of parts; apply a welded layer with different properties, ie high hardness and wear resistance. In this work we use point (point) hardening, which consists in micro-dripping of the hard alloy into the surface structure of parts that undergo intense abrasive wear. The geometry of the hardening point is a spherical sector, which facilitates the rapid removal of heat from the surfacing bath in the base metal and the environment, so the hardening points harden at high speed and in a short time. At point strengthening of details one of the main conditions providing stable quality of process - coordination of welding current and arc voltage. The sawtooth profile of the ploughshare blade (cultivator paws) is maintained throughout its service life. providing effective cutting even with the blades worked.

We will fully consider the welding stress and deformation of the steel and tungsten carbide, to ensure the using performance of products. About tungsten carbide, we use the most advanced production equipment and the most reasonable production process during the material selection, burdening, pressing and sintering. We

always fully consider the special requirements of different products on the strength, hardness, grain size of tungsten carbide.

share plough, friction surface, abrasive wear, operating longevity, point welding , with carbide coating (with hard metal)

Одержано (Received) 13.05.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 10.09.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.285-293

А. О. Сергєєв, асп., **В. М. Боков,** проф., канд. техн. наук, **В. М. Шмельов,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com

Удосконалення електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата з ручною подачею електрода-інструмента

Запропоновано самогальмувальну передачу в якості механізму керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата. Показано, що використання такої електроерозійної головки дозволяє покращати її експлуатаційні характеристики за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

електроерозійна головка, розмірна обробка дугою, настільний свердлувальний верстат, вал-шестерня рейкової передачі, черв'ячна передача

Постановка проблеми. В теперішній час в машинобудуванні номенклатура оброблюваних матеріалів та форма оброблюваних виробів стимулюють застосування різних видів електричної обробки металів. Найбільш поширений з них є електроімпульсна обробка. Вона сьогодні досягла досконалості, та дозволяє обробляти отвори і порожнини з точністю до 0,01 мм при використанні графітових електродів-інструментів, та забезпечує їх наднизький електроерозійний нанознос [1]. Так, електроерозійні верстати фірми Sodick мають лінійні сервоприводи, що здатні коректувати положення електрода-інструмента (зокрема торцевий міжелектродний зазор) 500 разів в секунду. Саме тому вартість такого верстата оцінюється сотнями тисяч доларів. Крім того, даний спосіб обробки використовує в якості енергоносія електричну іскру або електричний імпульс, які горять в торцевому міжелектродному зазорі з паузами. При паузі деталь не обробляється, тому електроімпульсний спосіб обробки не забезпечує максимально можливу продуктивність обробки.

В той ж е час, для умов ремонтних заводів та майстерень не потрібна висока точність обробки, а потрібне більш дешеве обладнання та велика продуктивність обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роботами [2, с. 1-2; 3, с. 4-5; 4, с. 3; 5, с. 3-4; 6, с. 7; 7] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД). При реалізації даного способу електрична дуга безперервно (без технологічних пауз) горить між електродом-інструментом та електродом-заготовкою в поперечному потоці робочої рідини. Потік стискує електричну дугу як в енергетичному, так і в геометричному плані та забезпечує надійне вилучення продуктів ерозії із зони обробки. Продуктивність способу РОД приблизно на порядок перевищує

© А.О. Сергєєв, В.М. Боков, В.М. Шмельов, 2023

продуктивність електроімпульної обробки. Значне підвищення продуктивності пояснюється не тільки відсутністю пауз при обробки, але і тим, що з'явилася можливість простими засобами (за допомогою зварювальних випрямлячів) вводити в зону обробки великі потужності постійного технологічного струму.

За роботою [8, с. 55] відомий типовий електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга 8м», що реалізує процес РОД, який включає в себе, власне, верстат у складеному стані, гідростанцію, масло збірник, пульт керування, джерело живлення технологічним струмом, електрошафу, шафу інструментальну і дві підставки, та займає достатньо велику площу (16 м^2). Він постачається електро-гідравлічним приводом автоматичного слідкування за торцевим міжелектродним зазором. Даний верстат задовольняє умові щодо створення для ремонтних заводів та майстерень електроерозійного верстата великої продуктивності обробки, але не задовольняє умові щодо його малої вартості.

Відома електроерозійна головка розмірної обробки дугою [8, с. 187], що створена на базі настільного верстата (рис. 1). Вона має ручну осьову подачу електрода-інструмента від вал-шестерні, що приводиться в дію штурвалом. Вал-шестерня є частиною рейкової передачі, а рейкою служить шпиндельна втулка. Наявність ручної подачі суттєво спрощує установку: відпадає потреба в станції гідроприводу, в слідкуючому гідроциліндрі, спрощується пульт керування тощо. Електроерозійна головка на базі настільного свердлувального верстата проста у виготовленні, займає невелику площу (до 6 м^2), не потребує модернізації базового верстата, а отже, витрати додаткових коштів, мало коштовна, а тому може застосовуватися на ремонтних заводах та в майстернях

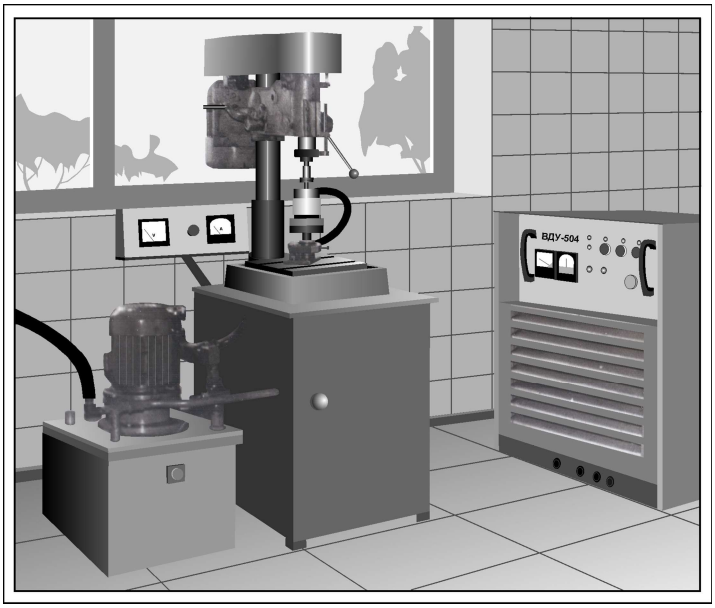


Рисунок 1 – Електроерозійна прошивна головка, що створена на базі настільного свердлувального верстата

Джерело: розробка автора Бокова В. М.

Однак при експлуатації відомої електроерозійної головки оператор відчуває на рукоятці штурвала, яким здійснює подачу електрода-інструмента, велике зусилля. Причому, чим більше різниця між зовнішнім діаметром електродотримача та діаметром отвору, що прошивається, тим більше зусилля, яке потрібно переборювати оператору. Саме тому, коли різниця діаметрів досягає певного рівня, подальше утримання

електрода-інструмента стає неможливим. Процес обробки припиняється. Це призводить до суттєвого звуження експлуатаційних характеристик головки. Крім того, при частих штучних коротких замиканнях, що пов'язані з точністю подачі, якість обробки погіршується. Саме тому застосування головки на ремонтних заводах та майстернях обмежено.

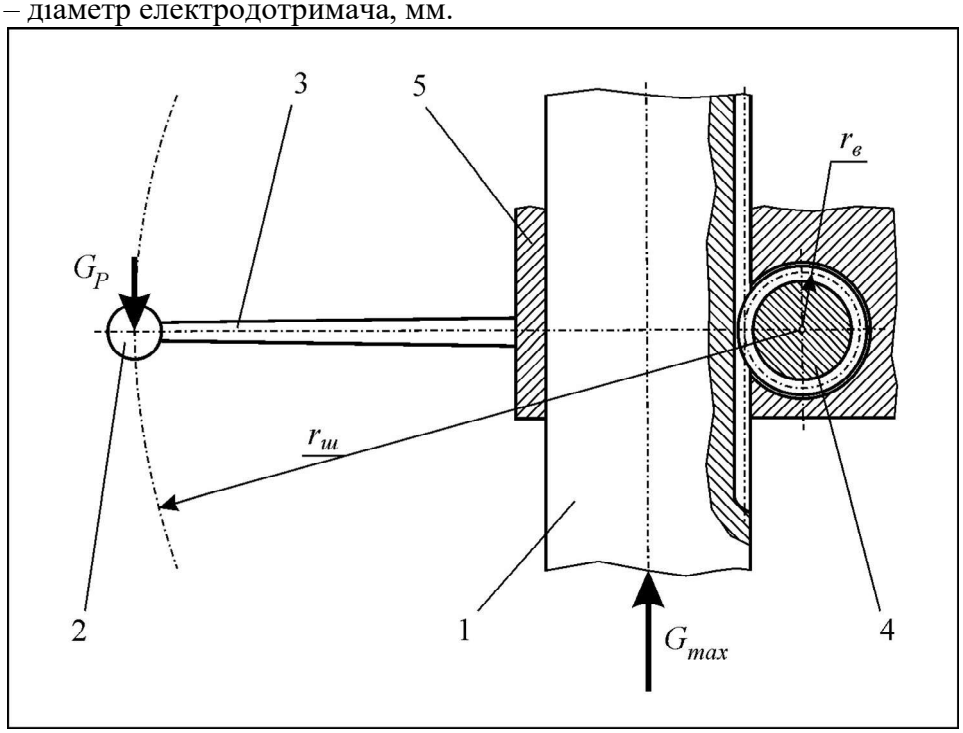
Максимальне зусилля G_{max} (рис. 2), що діє на шпиндельну втулку 1 з боку герметичної камери, визначається за формулою (1):

$$G_{max} = F_e \cdot P_{cm}, \quad (1)$$

де F_e – площа електродотримача 11 (рис. 3), що сприймає тиск робочої рідини, мм^2

$$F_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad (2)$$

P_{cm} – статичний тиск робочої рідини в герметичній камері, МПа;
D – діаметр електродотримача, мм.



1 – шпиндельна втулка; 2 – рукоятка; 3 – штурвал; 4 – вал-шестерня; 5 – корпус

Рисунок 2 – Схема дії сил в зоні керування осьовою подачею електрода-інструмента на електроерозійній прошивній головці, що створена на базі настільного свердлувального верстата
Джерело: розробка авторів

Для зручності роботи, зусилля G_p (рис. 2) на рукоятці 2 штурвала 3, що сприймає оператор, звичайно, не повинно перевищувати 50 Н. Воно визначається за формулою (3):

$$G_p = \kappa \cdot G_{max}, \quad (3)$$

де κ – коефіцієнт, що ураховує зменшення зусилля за рахунок різниці між радіусами вал-шестерні та штурвала $r_ш$ (4):

$$\kappa = \frac{r_в}{r_ш}. \quad (4)$$

Якщо прийняти реальні значення для G_p = 50 Н та для $\kappa = \frac{25}{500} = 0{,}05$, то за формулою (3) визначимо максимальне зусилля G_{max}, що повинно діяти на шпиндельну втулку 1:

$$G_{\max} = \frac{G_p}{\kappa} = \frac{50}{0{,}05} = 1000 \text{ Н}. \quad (5)$$

Із виразу (1) для цих умов визначаємо максимально допустимий статичний тиск робочої рідини в герметичній камері:

$$P_{ст} = \frac{G_{\max}}{F_e} = \frac{1000}{5024} = 0{,}19 \text{ МПа}, \quad (6)$$

де $F_e = \frac{3{,}14 \cdot 80^2}{4} = 5024 \text{ мм}^2$. (7)

При такому низькому тиску (6), як відомо [3], процес РОД не відбувається: спостерігається плавлення металу. Це негативно впливає на якість обробки, а саме, шорсткість обробленої поверхні – поза класу. Для підвищення якості обробленої поверхні, звичайно, електричну дугу більш інтенсивно стискають динамічним потоком робочої рідини. З цією метою статичний тиск рідини підвищують до рівня 0,3 – 1,5 МПа. Але для даних умов це неможливо, бо зусилля на рукоятці значно зростає, а підвищення радіусу штурвала $r_ш$ приводить до погіршення зручності керування. Крім того, оператор повинен весь час тримати рукоятку штурвала, поки в камері є тиск, що теж є незручністю.

Постановка завдання. Із викладеного вище виходить, що для умов ремонтних заводів та майстерень доцільно покращати експлуатаційні характеристики електроерозійної головки на базі настільного свердлувального верстата за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

В зв’язку з цим, певний практичний інтерес представляє можливість застосування для розвантаження оператора самогальмувальної передачі. Така можливість не була об’єктом дослідження.

Метою дослідження є покращання експлуатаційних характеристик головки та підвищення якісних показників обробки в результаті застосування самогальмувальної передачі.

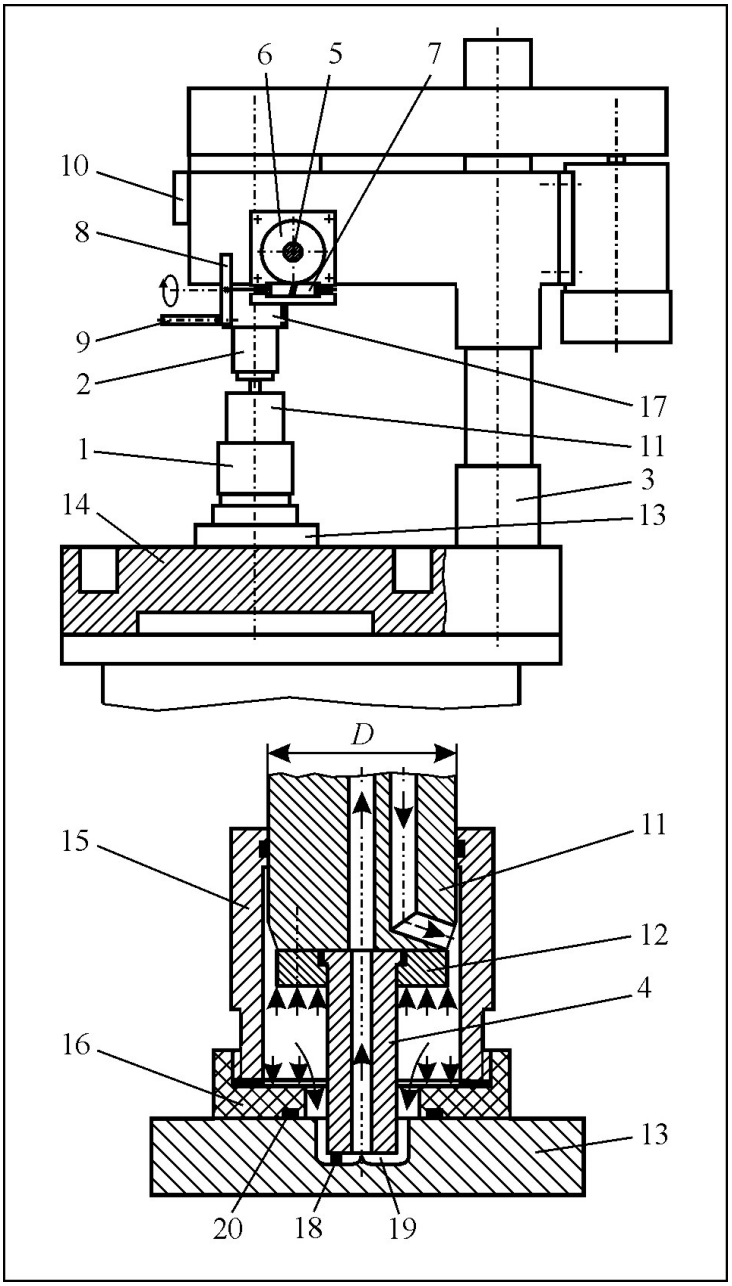
Для досягнення поставленої мети необхідно запропонувати для оператора розвантажувальний механізм керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата та навести опис його роботи.

Виклад основного матеріалу. Для розвантаження оператора від осьового зусилля робочої рідини в герметичній камері головки, що передається на шпиндельну втулку, доцільно використати конструктивні можливості настільного свердлувального верстата. Верстат, як показано віще, має вал-шестерню, що приводиться в дію штурвалом.

Саме тому, задача щодо розвантаження вирішується у відомій електроерозійній головці розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата з ручною подачею електрода-інструмента від вал-шестерні за рахунок того, що на місце штурвала приводу вал-шестерні встановлено самогальмувальну передачу, наприклад

однозахідну черв'ячну, з маховичком та рукояткою, а головка постачається амперметром, що вимірює силу струму в процесі обробки, причому амперметр розташований в полі зору оператора.

Пояснення щодо роботи запропонованого механізму керування ручною подачею електрода-інструмента наводиться на рис. 3.



1 – електроерозійна головка; 2 – шпиндель; 3 – настільний свердлувальний верстат; 4 – електрод-інструмент; 5 – вал-шестерня; 6 – черв'ячне колесо; 7 – черв'як; 8 – маховичок; 9 – рукоятка; 10 – амперметр; 11 – електродотримач; 12 – тримач; 13 – електрод-заготовка; 14 – робоча плита; 15 – герметична камера; 16 – електроізолятор; 17 – шпиндельна втулка; 18 – електрична дуга; 19 – міжелектродний зазор; 20 – ущільнювальне кільце

Рисунок 3 – Схема електроерозійної головки розмірної обробки дугою, що пропонується: а – загальний вид; б – перетин робочої зони

Джерело: розробка авторів

Електроерозійна головка 1 змонтована на шпинделі 2 настільного свердлувального верстата 3 з ручною осьовою подачею електрода-інструмента 4 від вал-шестерні 5, з якої попередньо було знято штурвал її приводу (на кресленні не показано). На місце штурвала в кінематичному зв'язку з вал-шестернею 5 встановлено самогальмувальну передачу, наприклад однозахідну черв'ячну (черв'ячне колесо 6, черв'як 7), з маховичком 8 та рукояткою 9. Головка 1 постачається амперметром 10, що вимірює силу технологічного струму в процесі обробки, причому амперметр 10 розташований в полі зору оператора.

Для реалізації процесу прошивання отвору електрод-інструмент 4 закріплюють на електродотримачі 11 за допомогою тримача 12. Електрод-заготовку 13 кладуть на робочу плиту 14 верстата 3, підводять її під електрод-інструмент 4 та позиціонують відносно нього. Електрод-заготовку 13 закріплюють відносно плити 14 (на кресленні кріплення не показано). Шпиндель 2 разом з електродотримачем 11 та електродом-інструментом 4 піднімають вгору і на електродотримач 11 одягають герметичну камеру 15 разом з електроізолятором 16. Далі шпиндель 2 опускають так, щоб камеру 15 можна було б руками перемістити вниз до контакту електроізолятора 16, а між електродом-інструментом 4 та електродом-заготовкою 13 був гарантований зазор декілька міліметрів. Головка 1 підготовлена до роботи.

Для прошивання отвору вмикають електродвигун насосу подачі робочої рідини в герметичну камеру 15 (на кресленні не показано) та джерело живлення постійним технологічним струмом (звичайно зварювальний випрямляч; на кресленні не показано). Обертаючи маховичок 8 рукояткою 9, передають обертальний рух черв'яку 7, а черв'як – черв'ячному колесу 6, яке передає орбітальний рух вал-шестерні 5, яка пов'язана з шпиндельною втулкою 17 рейковою передачею (на кресленні не показано). Шпиндельна втулка 17 отримує осьовий рух та опускається, а з нею електродотримач 11 з електродом-інструментом 4. Підходячи до електрода-заготовки 13 на певну відстань (звичайно соті долі міліметра), між електродом-інструментом 4 та електродом–заготовкою 13 збуджується електрична дуга 18, яка горить в торцевому міжелектродному зазорі 19 в потужному гідродинамічному тиску робочої рідини та здійснює обробку отвору. Усталеність обробки контролюється амперметром 10: при великому торцевому міжелектродному зазорі 19 сила струму дорівнює нулю і обробка припиняється (команда на подальше зближення електродів 4, 13); при надто малому між-електродному зазорі 19 сила струму відповідає короткому замиканню (команда на подальше розведення електродів 4, 13). Статичний технологічний тиск рідини в камері 15 може досягати 1,5 МПа. Даний тиск діє в камері як на електроізолятор 16 (дивись стрілки вниз), так і на рухомий електродотримач 11 (дивись стрілки вгору). Тиск, що діє вниз є корисним, тому що він гарантує стиснення ущільнювального кільця 20, а отже герметизує нижню частину камері 15. Тиск, що діє вгору, передається механізму ручної подачі електрода-інструмента. Дане технічне рішення передбачає сприймання зусилля від даного тиску не руками, а самогальмувальною передачею, зокрема однозахідною черв'ячною (дивись черв'ячне колесо 6, черв'як 7). Крім того, самогальмувальна передача забезпечує значно більшу точність подачі електрода-інструмента 4. При цьому кількість випадкових коротких замикань значно зменшується, а якість обробки підвищується.

Слід відмітити, що однозахідна черв'ячна передача, колесо 6 якої з'єднано з вал-шестернею 5, а черв'як 7 з маховичком 8, який має рукоятку 9, утворюють редуктор із сумарним передатним числом $i_{сум}$, що визначається за формулою (8):

$$i_{сум} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 , \qquad (8)$$

де i_1 – передатне число між вал-шестернею 5 (z_1 = 18) та черв'ячним колесом 6 (z_2 = 30); i_2 – передатне число між черв'яком 7 (z_3 = 1) та черв'ячним колесом 6 (z_2 = 30); i_3 – передатне число між черв'яком 7 ($r_ч$ = 10) та маховичком 8 (r_p = 50).

Для реальних значінь параметрів, що вказані у дужках, $i_{сум}$ = 255.

Максимальне зусилля G_{max}, що діє на шпиндельну втулку 17 з боку герметичної камери при максимально допустимого статичному тиску $P_{ст}$ = 1,5 МПа, визначається за формулою (1):

$$G_{max} = F_e \cdot P_{ст} = 5024 \cdot 1{,}5 = 7536 \text{ Н}.$$

Тоді, зусилля на рукоятці маховичка G_p, що сприймає оператор, визначиться за формулою (9):

$$G_p = \frac{G_{\max}}{i_{сум}} = \frac{7536}{255} = 29{,}5 \text{ Н}. \quad (9)$$

Як бачимо, зусилля оператора на рукоятці маховичка в даному механізмі при максимально допустимому статичному тиску значно менше допустимого зусилля, яке складає 50 Н. Це дозволяє суттєво покращати якість обробки, так як якість залежить від тиску. Крім того, в даному самогальмувальному механізмі оператор не повинен весь час тримати рукоятку маховичка, поки в камері є тиск, що підвищує зручність керування.

Висновки. Запропоновано самогальмувальну передачу в якості механізму керування ручною подачею електрода-інструмента для електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата. Показано, що використання такої електроерозійної головки дозволяє покращати її експлуатаційні характеристики за рахунок розвантаження оператора від осьових зусиль при керуванні та підвищити якісні показники обробки шляхом зменшення кількості коротких замикань та підвищення точності керування.

Список літератури

1. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов . Харьков: ПРАТ «Полиграфсервис», 2013. 104 с.
2. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис… д-ра техн. наук: 05.03.07 / Київ : НТУУ «КПІ», 1999. 36 с.
3. Боков В.М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою : монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002 . 300 с.
4. Боков В.М., Попова М. І. Обробка отворів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2014 . 160 с.
5. Боков В.М., Сіса О.Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013 . 172 с.
6. Боков В.М. Фізичні процеси спецтехнологій. Експериментальні дослідження. Збірник статей. Кропивницький: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2022. 625 с.
7. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць КНТУ*. 2017. Вип 30. С.103-110.
8. Боков В.М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстати . Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2020. 316 с.

References

1. Stavickij, B.I. (2013). *Iz istorii jelektroiskrovoj obrabotki materialov* [*From the history of electrospark processing of materials.]*. Har'kov: PRAT «Poligrafservis» [in Russian].
2. Nosulenko, V.I. (1999). Rozmirna obrobka metaliv elektrychnoiu duhoiu [Dimensional processing of metals with an electric arc]. *Extended abstract of doctor's thesis.* Kyiv : NTUU «KPI» [in Ukrainian].
3. Bokov, V.M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon elektrychnoiu duhoiu* [*Dimensional shaping of surfaces by an electric arc*]. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
4. Bokov, V.M., Popova, M.I. (2014). *Obrobka otvoriv elektrychnoiu duhoiu* [*Treatment of holes with electric arc*]. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
5. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obrobliuvanist materialiv elektrychnoiu duhoiu* [*Processing of materials with an electric arc*]. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
6. Bokov, V.M. (2022). *Fizychni protsesy spetstekhnolohii. Eksperymentalni doslidzhennia. Zbirnyk statei* [*Physical processes of special technologies. Experimental studies. A collection of articles*]. Kropyvnytskyi: Polihrafichno-vydavnychyi tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
7. Nosulenko, V.I., & Shmelov, V.M. (2017). Osoblyvosti elektrychnoi duhy v poperechnomu pototsi ridyny [Features of the electric arc in the transverse flow of liquid.]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia* : *zb. nauk. prats KNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation : Collected Works of KNTU*, *Issue 30*,103-110 [in Ukrainian].
8. Bokov, V.M. (2020). *Tekhnolohiia rozmirnoi obrobky duhoiu. Istorychnyi narys, verstaty* [*Technology of dimensional processing with an arc. Historical essay, machines.]*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].

Anton Sergeev, graduate student, **Viktor Bokov,** Prof., PhD tech. sci., **Vitaly Shmelov,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University

Improvement of the EDM Head for Dimensional Processing With an Arc on the Basis of a Desktop Drilling Machine With Manual Feeding of the Electrode-Tool

Currently, in mechanical engineering, the nomenclature of processed materials and the shape of processed products stimulate the use of various types of electrical processing of metals. The most common of them is electropulse treatment. The cost of a modern electric pulse machine is estimated at hundreds of thousands of dollars. In addition, this method of processing uses as an energy carrier an electric spark or an electric pulse that burns in the end interelectrode gap with pauses. During a pause, the part is not processed, therefore, the electropulse method of processing does not provide the maximum possible processing productivity. At the same time, the conditions of repair factories and workshops do not require high processing precision, but require cheaper equipment and high processing performance. A highly productive method of dimensional processing of metals with an electric arc is known.

A well-known electroerosion head for dimensional treatment with an arc, created on the basis of a desktop machine. It has a manual axial feed of the electrode-tool from a gear shaft driven by a steering wheel, easy to manufacture, occupies a small area, does not require the modernization of the basic machine, and therefore does not require additional funds, is not expensive, and therefore can be used in repair factories and in workshops. However, when operating a known EDM head, the operator feels a great force on the handle of the steering wheel, which feeds the electrode-instrument. Moreover, the greater the difference between the outer diameter of the electrode holder and the diameter of the hole being stitched, the greater the effort the operator must overcome. This leads to a significant narrowing of the operational characteristics of the head. In addition, with frequent artificial short circuits related to the accuracy of the feed, the quality of processing deteriorates. That is why the use of the head in repair factories and workshops is limited.

The purpose of the research is to improve the operational characteristics of the head and increase the quality indicators of processing due to the use of a self-braking transmission.

The task of unloading is solved in the well-known electroerosion head of dimensional treatment with an arc on the basis of a table-top drilling machine with manual feeding of the electrode-tool due to the fact that a self-braking transmission, for example, a one-way worm, with a flywheel and a handle, is installed in place of the steering wheel of the gear shaft drive, and the head is supplied with an ammeter that measures the current strength during processing, and the ammeter is located in the field of view of the operator.

A self-braking transmission is proposed as a control mechanism for the manual feeding of the electrode-tool for the EDM head of dimensional treatment with an arc based on a desktop drilling machine. It is shown that the use of such an EDM head allows to improve its operational characteristics by relieving the operator from axial forces during control and to increase the quality indicators of processing by reducing the number of short circuits and increasing control accuracy.

EDM head, dimensional arc machining, table drilling machine, rack gear shaft, worm gear

Одержано (Received) 12.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.294-304

О.І. Кепко, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий,** доц., канд. техн. наук,
О.Ю. Ковальчук, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна
e-mail: piop@udau.edu.ua

Структурно-логічна схема автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць

В процесі проектування автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць з регенерацією повітря було обґрунтовано та розроблено структурно-логічну схему управління, яка передбачає управління технологічними параметрами (температурою, вологістю, концентрацією CO_2, освітленістю). Структурно-логічна схема була створена на основі технологічної карти вирощування гливи звичайної з урахуванням зміни температури, вологості, концентрації CO_2 та освітленості у функції часу.

замкнута система вентиляції, регенерація повітря, структурно-логічна схема, вирощування грибів

Постановка проблеми. Інтерес до автоматизації теплиць зараз досяг значного рівня. Впровадження цифрових технологій в аграрне виробництво дозволило запровадити нові технології, технічну інформацію та зручність управління, зробивши рослинництво керованим на основі таких технологій [1].

Характер і тривалість перехідних процесів в теплицях при великих обсягах виробництва [2, 3] вимагає моделювання цих процесів для оцінки об'єкта на будь-якій ділянці перехідного процесу [4, 5]. Це питання особливо актуальне для замкнутих систем вентиляції, через їх складність.

Точності і надійності автоматичного управління при наявності систематичної і випадкової похибки покладають на дослідника відповідальну задачу, а їх оцінка проводиться з використанням методів теорії ймовірностей і математичної статистики [6].

Сучасні промислові штами гриба глива розроблялися з метою отримання найвищих врожаїв плодової маси при найменших витратах на їх виробництво.

Як це часто буває, штучно створені сорти пред'являють більш жорсткі вимоги в технології вирощування, ніж їх "дикі предки". Тому створення і підтримування мікроклімату на високому рівні є вимогою обов'язковою [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо типову технологію вирощування гливи. Найчастіше гливу вирощують на субстраті з соломи злакових культур або з відходів кукурудзи, які подрібнюють до частинок 2–4 см, після чого зволожують до 75% протягом кількох днів. Реакція середовища повинна бути близькою до нейтральної (pH близько 6,5). Змочений та добре перемішаний матеріал розміщують в камері для пастеризації, де пастеризують насиченою парою, яку пускають в камеру при температурі 65–70°С з постійною циркуляцією повітря. Пастеризація продовжується

© О.І. Кепко, І.О. Лісовий, О.Ю. Ковальчук, 2023

12 годин. Далі субстрат охолоджують до 24...25°С, і змішують з міцелієм (2–5% маси субстрату), потім укладають в мішки і розміщують на стелажах в камері пророщування [8].

Камерою пророщування може бути камера пастеризації або спеціальна камера, яка має систему вентиляції та циркуляції повітря. Міцелій росте протягом 15–20 днів при відносній вологості повітря 90–95%. Температуру повітря в цей період підтримують в межах 18–20°С. Під час росту міцелій гіфами з'єднує частини субстрату, який після звільнення ємкостей залишається у вигляді блоків.

Процес плодоутворення у гливи починається після достигання міцелію і продовжується 3 тижні при температурі 20–22°С. В цей період культуру не поливають, але забезпечують добре провітрювання приміщення. Після чого субстрат виймають з мішків і блоки розміщують в плівкові або скляні теплиці штабелями (з проходами для догляду за культурою). Штабелі укривають плівкою і приміщення охолоджують до 10–12°С. Через 2–3 дні поверхня субстрату стає кремовою від появи зародків плодових тіл. Плівку зі штабелів знімають. В період плодоношення підтримують температуру повітря 12...14°С, відносну вологість 95%, проводять вентиляцію. Приміщення для вирощування гливи повинно мати світлопроникну покрівлю або штучне освітлення. Догляд в період плодоношення складається з підтримання оптимальної температури, вологості, концентрації CO_2 та освітленості.

Постановка завдання та виклад основного матеріалу.Виходячи з вищенаведеного, процес вирощування гливи можна розбити на три основні фази: перша фаза – вегетативний ріст, друга – перехід від вегетативного росту до плодоношення, третя фаза – плодоношення. Очевидно, що фази росту – це є функція часу, тобто $Ф = f(I)$. Виходячи з цього, складемо технологічну карту процесу вирощування культури, опускаючи при цьому процес підготовки субстрату (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічна карта вирощування гливи звичайної

Фази	Період	Процес	Строк виконання
I	1	Пророщування міцелію	15–20 днів
II	2	Процес плодоутворення	3 тижні
	3		2–3 тижні
III	4	Період плодоношення	до кінця плодоношення

Джерело: розроблено автором

Складемо технологічну карту зміни температури, вологості, концентрації CO_2 та освітленості у функції часу (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри вирощування гливи звичайної

Фази	Період	Температура, t, °С	Вологість, Н, %	Концентрація CO_2, С, %	Освітлення, Е, лк
I	1	18–20	90–95	–	–
II	2	20–22	90	0,08–0,1	500
	3	10–12	90	0,08–0,1	500
III	4	12–14	90	0,08–0,1	500

Джерело: розроблено автором

Аналогічно розглядаються культури, які вирощуються в інші приміщеннях трайдему.

Обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою автоматичного керування ЗСВ. Починаючи проектування, потрібно визначити вид автоматичного керуючого пристрою (АКП). Процес вирощування розбито на кілька мініпроцесів (табл. 2), які слідують один за одним, паралельно один одному, і пов'язані між собою функцією часу. Наприклад, режим опалення в першому періоді переходить в режим опалення другого періоду, а той – в режим третього періоду. Такий процес буде відповідати АКП типу "автомат".

Для зручності складено узагальнюючу модель об'єкта управління у вигляді "чорного ящика" (рис. 1).

Згідно технології вирощування можна виділити 4 керовані величини: Y_1 – температура; Y_2 – вологість; Y_3 – концентрація CO_2; Y_4 – освітлення.

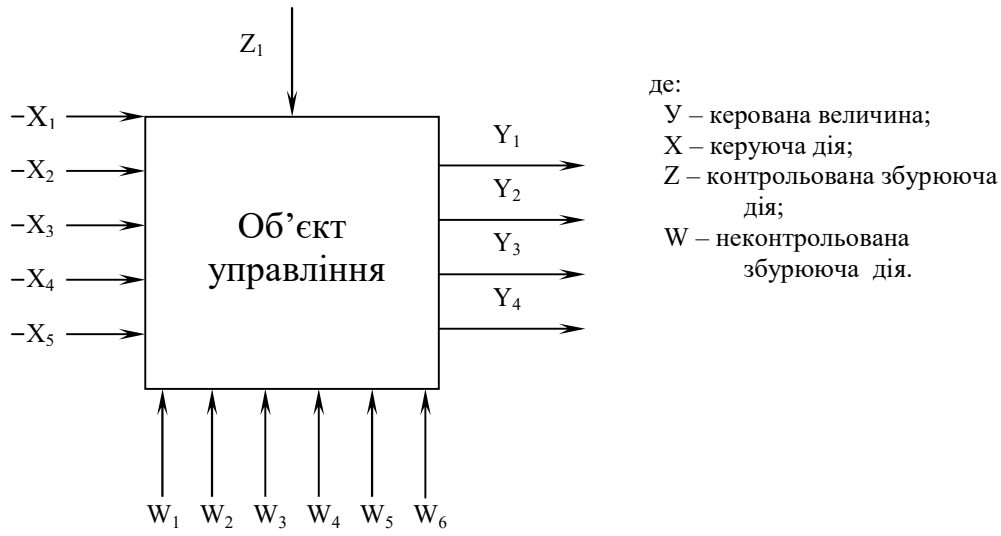


Рисунок 1 – Модель об'єкту управління

Джерело: розроблено автором

Визначимо керуючу дію. Щоб забезпечити заданий рівень температури в культиваційному приміщенні, потрібні – опалення приміщення в зимовий період та вентиляція в літній період. В першому випадку керуючою дією буде температура води в системі опалення X_1, а в другому величина повітрообміну системи вентиляції X_2. Для забезпечення заданої вологості необхідно або видаляти зайву вологу за допомогою вентиляції, або зволожувати приміщення (при нестачі вологи). Технологія вирощування гливи передбачає підтримання вологості повітря в першому і четвертому періодах (табл. 2) вище за атмосферну, а в другому та третьому – на рівні атмосферної. В зв'язку з цим, для першого і другого періодів як керуючу дію виберемо продуктивність установки зволоження повітря X_3. В процесі дихання грибів виділяється значна кількість CO_2, для видалення зайвої вуглекислоти застосуємо вентиляцію, тому за керуючу дію приймаємо величину повітрообміну вентиляційної установки X_4. Для забезпечення режиму освітлення за керуючу дію виберемо час роботи освітлювальної установки X_5.

Керуючі дії X_2 та X_4однакові, тому вибираємо з них одну за принципом "диктуючої" шкідливості. Вибір між керуючими діями X_2 та X_4 буде мати, в основному, сезонний характер. Так, літом перевагу буде мати повітрообмін X_2 в зв'язку

з підвищенням температури навколишнього середовища, а взимку, навпаки, вентиляція буде проводитись тільки для видалення CO_2.

Визначимо збурюючі дії, які впливають на об'єкт керування. Їх необхідно розбити на дві групи: контрольовані (які можливо і бажано вимірювати) та неконтрольовані (які вимірювати неможливо або не потрібно). На параметри мікроклімату в культиваційному приміщенні впливають контрольовані фактори (зовнішня температура Z_1) і неконтрольовані (швидкість вітру W_1, відкривання дверей і воріт W_2, вологість зовнішнього повітря W_3, концентрація CO_2 в зовнішньому повітрі W_4, природне освітлення W_5, теплота, яка надходить від освітлювальних приладів та технологічного обладнання W_6.).

Очевидно, що дана система керуючих дій передбачає попереднє визначення статичних та динамічних характеристик приміщення, в якому буде проводитись вирощування грибів.

Сформулюємо алгоритм функціонування і управління.

Замкнута система опалення та вентиляції в певний період доби працює як система із двох приміщень [9], тому модель об'єкту управління з деякими внутрішніми зв'язками буде мати вигляд (рис. 2).

Графічно алгоритм управління можна зобразити у вигляді блок-схеми (рис. 3).

Блок 2 передає управління 3 при виборі автоматичного режиму управління мікрокліматом в системі теплиць. У Блоці 3 формується завдання на роботу системи, вводяться вихідні дані по технологічних параметрах мікроклімату: *$t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{в3}$,* – температурі внутрішнього повітря, відповідно, в грибниці, світлиці та темниці; *$C_{в1}$, $C_{в2}$, $C_{в3}$,* – концентрації CO_2 в грибниці, світлиці та темниці; *$W_{в1}$, $W_{в2}$, $W_{в3}$,* – вологості внутрішнього повітря в грибниці, світлиці та темниці; *$E_{в1}$, $E_{в2}$,* – освітленості, відповідно, в грибниці та темниці; *x* – кількості повторів у циклах повтору (затримка).

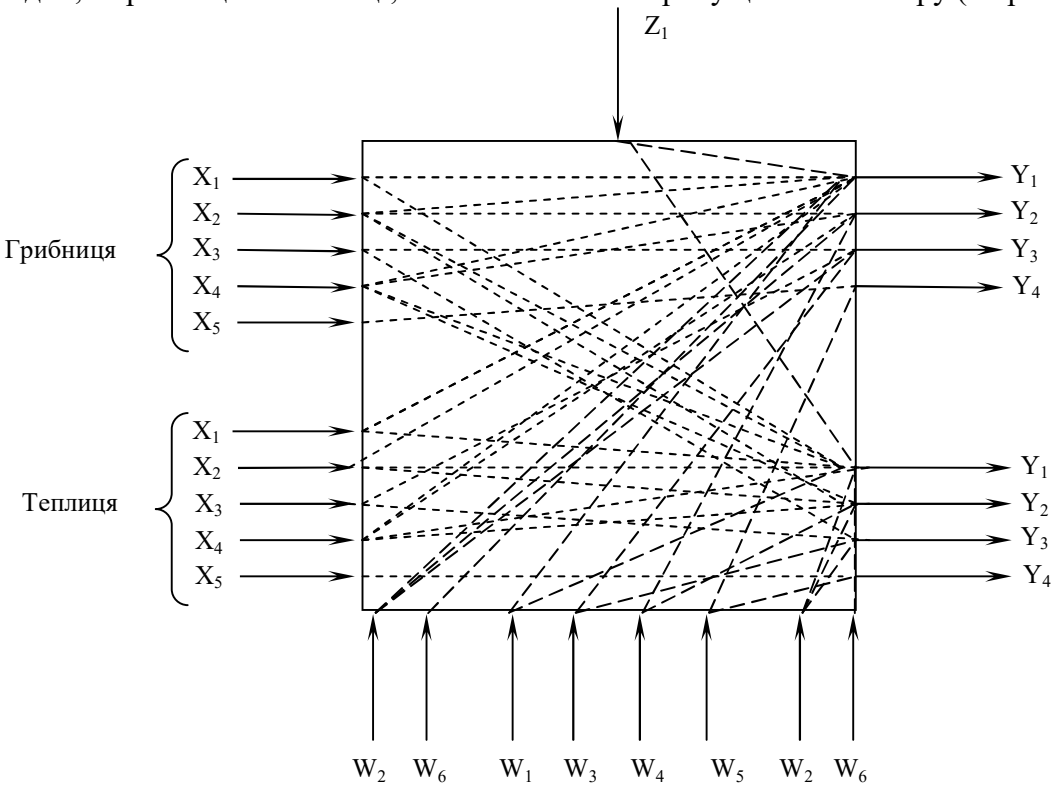
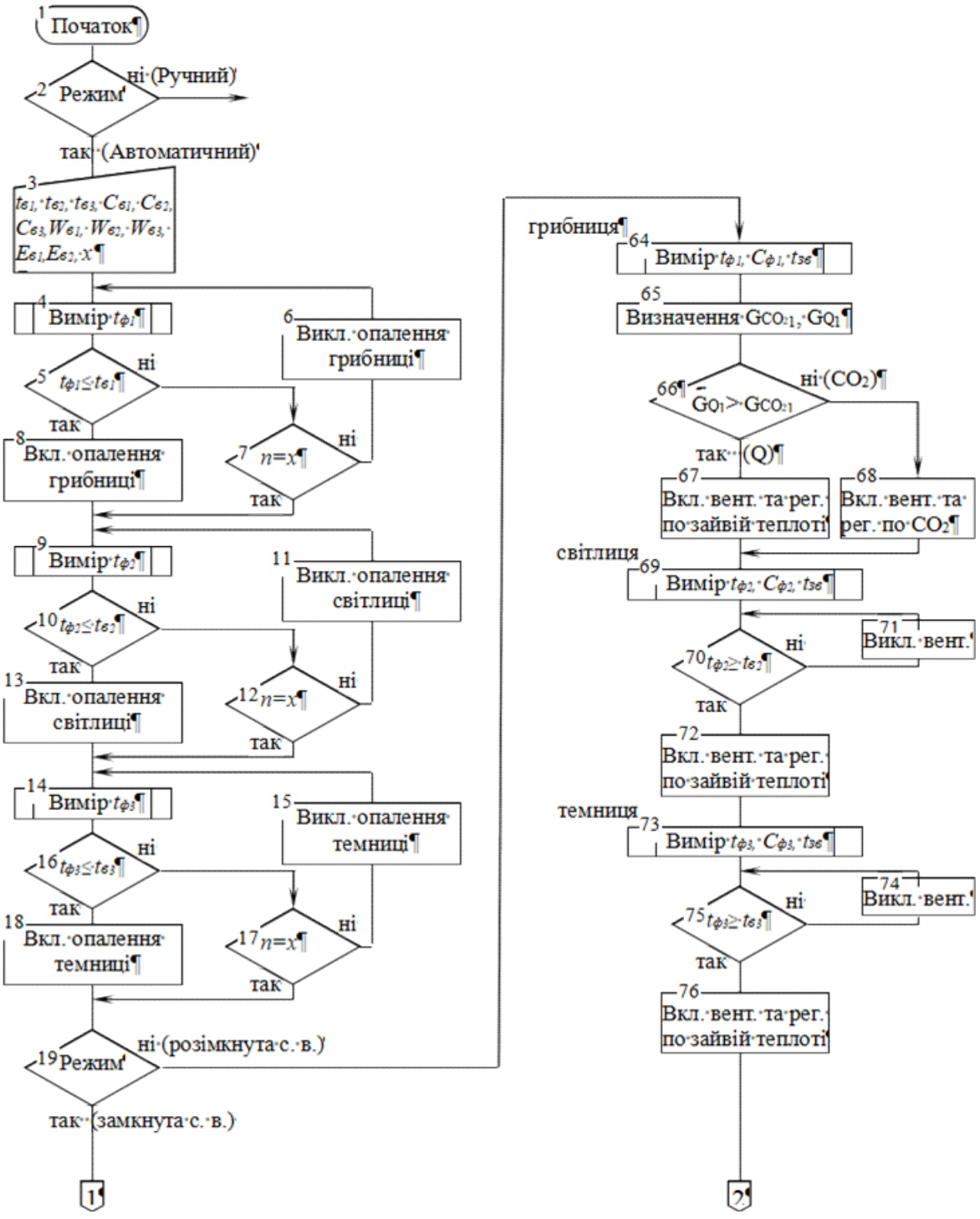


Рисунок 2 –Модель об'єкту управлення

Джерело: розроблено автором


1 Початок
2 Режим
ні (Ручний)
так (Автоматичний)
3 $t_{б1}, t_{б2}, t_{б3}, C_{б1}, C_{б2}, C_{б3}, W_{б1}, W_{б2}, W_{б3}, E_{б1}, E_{б2}, x$
4 Вимір $t_{ф1}$
5 $t_{ф1} \le t_{б1}$
ні
так
6 Викл. опалення грибниці
7 $n=x$
ні
так
8 Вкл. опалення грибниці
9 Вимір $t_{ф2}$
10 $t_{ф2} \le t_{б2}$
ні
так
11 Викл. опалення світлиці
12 $n=x$
ні
так
13 Вкл. опалення світлиці
14 Вимір $t_{ф3}$
15 Викл. опалення темниці
16 $t_{ф3} \le t_{б3}$
ні
так
17 $n=x$
ні
так
18 Вкл. опалення темниці
19 Режим
ні (розімкнута с. в.)
так (замкнута с. в.)
1
грибниця
64 Вимір $t_{ф1}, C_{ф1}, t_{зв}$
65 Визначення $G_{CO_2 1}, G_{Q1}$
66 $G_{Q1} > G_{CO_2 1}$
ні (CO_2)
так (Q)
67 Вкл. вент. та рег. по зайвій теплоті
68 Вкл. вент. та рег. по CO_2
світлиця
69 Вимір $t_{ф2}, C_{ф2}, t_{зв}$
70 $t_{ф2} \ge t_{б2}$
ні
так
71 Викл. вент.
72 Вкл. вент. та рег. по зайвій теплоті
темниця
73 Вимір $t_{ф3}, C_{ф3}, t_{зв}$
75 $t_{ф3} \ge t_{б3}$
ні
так
74 Викл. вент.
76 Вкл. вент. та рег. по зайвій теплоті
2

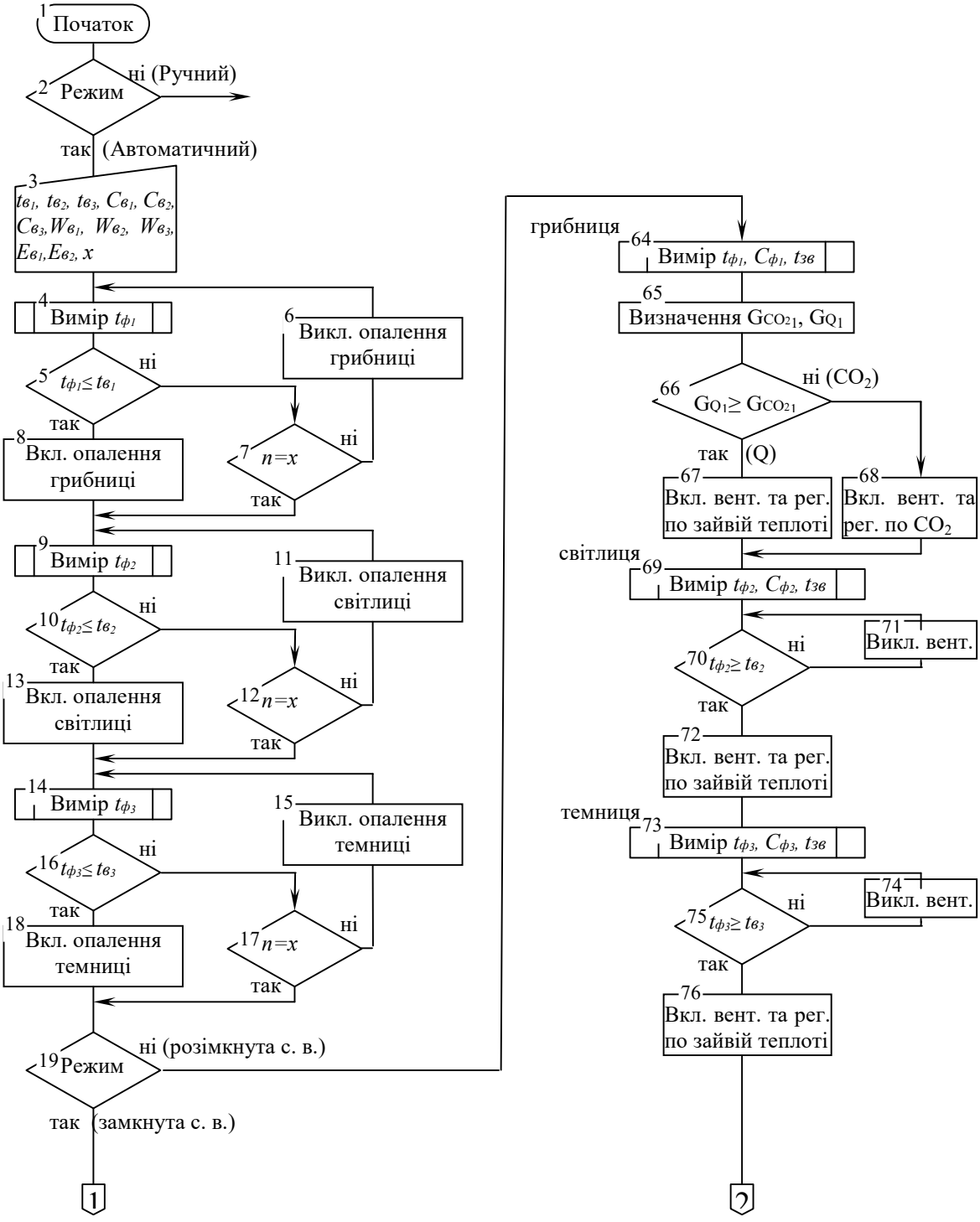


Рисунок 3.1 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції
Джерело: розроблено автором

4-й блок вимірює фактичне (поточне) значення внутрішньої температури у грибниці та посилає його у 5, де відбувається порівняння із заданим значенням температури $тв_1$. При $тф_1 \le тв_1$, блок 5 включає опалення грибниці, а при $тф_1 > тв_1$, проходячи через блок затримки 7, – включає його (блок 6). Аналогічними є алгоритми управління опаленням світлиці (блоки 9–13) та темниці (блоки 14–18).

У блоці 19 відбувається вибір способу управління вентиляцією теплиць –

„Розімкнута система вентиляції” або „Замкнута система вентиляції”. При виборі останньої, управління передається логічному блоку 20, де відбувається вибір пари приміщень „грибниця–світлиця” або „грибниця–темниця” в залежності від пори доби.

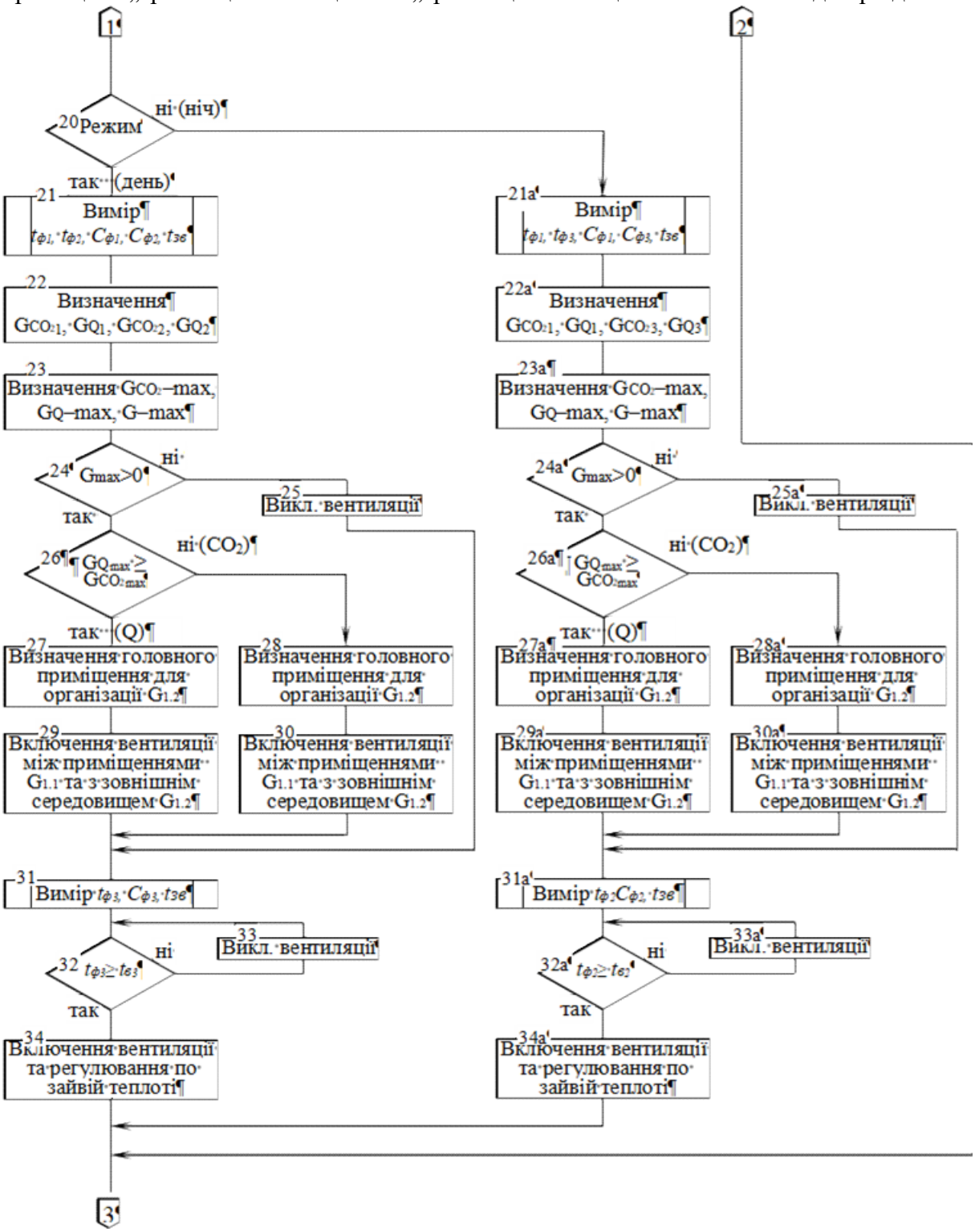


Рисунок 3.2 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції (продовження)

Джерело: розроблено автором

В світлу частину доби при виборі пари „грибниця–світлиця” управління

передається блоку 21, в якому відбувається вимірювання поточних значень внутрішніх температури повітря і концентрації CO_2 в обох приміщеннях $t\phi_1, t\phi_2, C\phi_1$, $C\phi_2$ та температури зовнішнього повітря $t_{зв}$. 22-й блок розраховує величини повітрообмінів по зайвій теплоті та CO_2 – $GCO2_1$, $GCO2_2$, GQ_1, GQ_2.

В 23-му блоці визначається максимальний з повітрообмінів по вуглекислоті GCO_{2max} та максимальний по зайвій теплоті GQ_{max}, а також максимальний з них – G_{max}. Далі управління передається блоку 24, в якому G_{max} порівнюється з нулем і при відсутності повітрообміну система вентиляції не вмикається 25. При $G_{max} > 0$ в блокові 26 відбувається вибір повітрообміну по шкідливості (зайвій теплоті або CO_2).

При $GQ_{max} \geq GCO_{2max}$ повітрообмін відбувається по надлишковій теплоті і управління передається блокові 27, де відбувається вибір головного приміщення з пари „грибниця–світлиця" по найбільшому з них повітрообміну. Повітрообмін цього приміщення розділяється на два повітрообміни: 1-й організовується між парою приміщень, 2-й – між головним приміщенням і зовнішнім повітрям [9]. Блок 29 включає вентилятори замкнутої системи вентиляції та проводить регулювання їх продуктивності. При $GQ_{max} < GCO2_{max}$ управління відбувається аналогічно (блоки 28, 30). У цей час в темниці вентилювання проводиться незалежно від пари „грибниця–світлиця" (блоки 31–34).

При виборі, у блоці 20, пари „грибниця–темниця" (нічний час) управління передається 21а і далі – аналогічно денному варіанту (блоки 21а – 34а).

При виборі розімкнутої автоматичної системи (блок 19) управління передається блоку 64, в якому вимірюється поточні значення $t\phi_1, C\phi_1$, $t_{зв}$ грибниці. 65-й блок розраховує повітрообмін по CO_2 та Q. У 66-му логічному блоці порівнюються розраховані у 65-му, тобто визначається шкідливість, по якій проводиться вентилювання грибниці. При $GQ_1 \geq GCO_{21}$ управління передається 67, який вмикає вентиляційну установку і проводить вентилювання по зайвій теплоті. При $GQ_1 < GCO_{21}$ управління передається блоку 68 який вмикає вентиляційну установку і проводить регулювання вже по концентрації CO_2 в приміщенні. Далі управління передається блоку 69, де вимірюються поточні значення температури повітря в світлиці $t\phi_2$, концентрації CO_2 – $C\phi_2$ та зовнішньої температури повітря $t_{зв}$. У 70 відбувається порівняння фактичного значення температури в світлиці $t\phi_2$ із заданим $tв_2$. При $t\phi_2 \geq tв_2$ управління передається 62 для включення вентиляційної установки і регулювання повітрообміну по зайвій теплоті, при $t\phi_2 < tв_2$ 61 включає вентиляційну установку. Вентилювання темниці відбувається аналогічно світлиці (блоки 73–76).

Алгоритм регулювання вологості в грибному приміщенні починається з блока 35, який вимірює фактичне значення вологості повітря в приміщенні $W\phi_1$ і передає управління на логічний блок 36, тут фактичне поточне значення вологості порівнюються з даним $Wв_1$. При $W\phi_1 < Wв_1$, після затримки у 37, вмикається установка зволоження 38. При $W\phi_1 \geq Wв_1$ зволожувальна установка вмикається 39. Алгоритм регулювання вологості в світлиці та темниці аналогічні алгоритму грибного приміщення, відповідно, блоки 40–44 та 45–49.

Алгоритм регулювання освітлення починається з блоку 50, який вимірює поточне значенні освітленості в грибниці і передає управління на логічний блок 52. При зменшенні освітлення в приміщенні грибниці нижче 1500 лк включається 50% ламп (блок 50). При $Е\phi_1 > 1500$ лк після блоку затримки 53 передається команда на виключення освітлення 51. Після вимірювання поточного значення освітленості у блоці 57 $Е\phi_1$ порівнюється із заданим значенням освітленості в 1000 лк. При $Е\phi_1 \leq 1000$ лк блок 59 включає 100% ламп системи освітлення при $Е\phi_1 > 1000$ лк. після блоку 58 управління передається на блок 56 відключення 50% ламп освітлювальної системи.

Управління освітленням в темниці проводиться по погодинній програмі, яка включає в себе блок 60 порівняння фактичного часу доби із заданим часом вмикання освітлення темниці (21.00) і блока 62 із часом вимикання. Включення і виключення освітлення проводиться блоками 61 і 63.

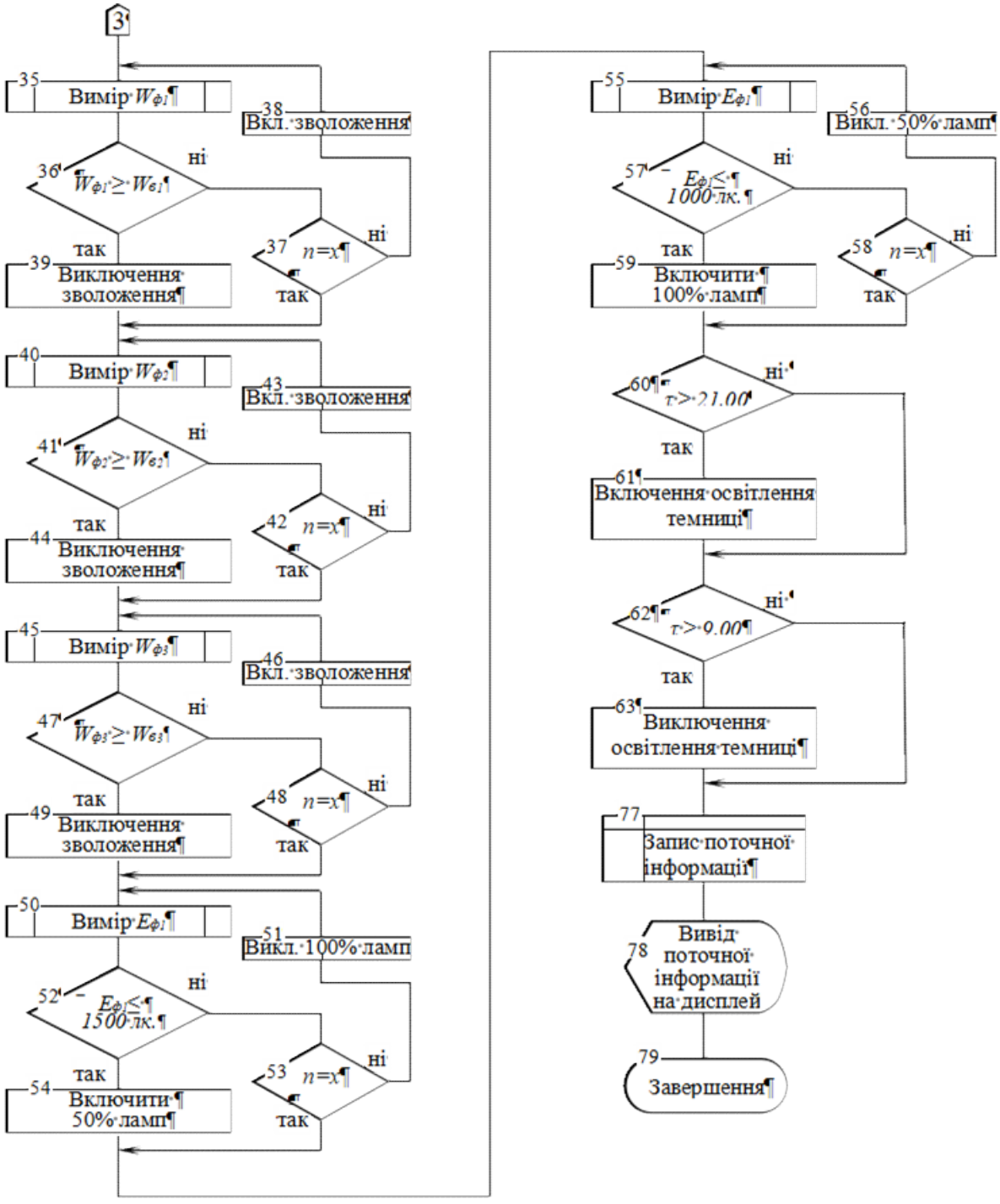


Рисунок 3.3 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції (закінчення)

Джерело: розроблено автором

Блоки 77 і 78 реалізують алгоритм запису поточної інформації на пристрій запам'ятовування та вивід інформації на пристрій індикації (монітор).

Алгоритм управління є основою для подальшого проектування.

Для вибору типу регулятора визначаємо, що $\tau/T_1 = 0,11$ і $\tau/T_{2a} = 44,8$ [10].

При відношенні $\tau/T > 0,2$ вибираємо регулятор безперервної дії.

Всі прилади та виконавчі пристрої працюють на електроенергії.

Як видно з алгоритму управління, автомат повинен мати пам'ять. Протягом всього технологічного циклу пристрій повинен пам'ятати значення температури, вологості, концентрації CO_2 та освітленості в кожному приміщенні та інші.

По виду пам'яті, яка використовується, пристрій буде синхронним, так як зміна параметрів автоматичного пристрою управління (АПУ) буде відбуватися в момент надходження синхронізуючих імпульсів.

В зв'язку з тим, що деякі перехідні процеси не є стабільними, і мають коливальний характер, за винятком, у нашому випадку, освітленості, то виникає необхідність ввести в алгоритм управління затримку для реагування системи на тривалість імпульсів.

Висновки:

1. Встановлено, що з точки зору автоматичного управління температурою субстрату та повітря, система „культиваційне приміщення – теплиця" з водяною системою опалення являє собою двоємнісний об'єкт.

2. Обґрунтовано та розроблено структурно-логічну схему управління замкнутою системою опалення та вентиляції, яка передбачає управління технологічними параметрами (температурою, вологістю, концентрацією CO_2, освітленістю) в системі.

Список літератури

1. Achour Yasmine, Ouammi Ahmed, Zejli Driss, Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147(3). pp.111251
2. Sethi V.P., Sumathy K., Lee C., Pal D.S. Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*. 2013. Vol. 96. pp. 56–82.
3. Costantino A., Comba L., Sicardi G., Bariani M., Fabrizio E. Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*. 2021. Vol. 288. Pp. 116583.
4. Gorobec V., Yatsenko O. Development and heating systems mathematical model of heat and mass transfer in the greenhouse with alternative energy sources. *Energy and automation*. 2014. Vol. 1.
5. Dudnyk A. O. Synthesis and research of mathematical models of energy consumption for heating greenhouses in winter. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry*. 2014. Vol. 194 (3). Pp. 218–222.
6. Шелестовський Б.Г., Габрусєв Г.В., Габрусєва І.Ю. Вища математика: теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посібник. Тернопіль : СМП "Тайп", 2023. 142 с.
7. Achour Yasmine, Ouammi Ahmed, Zejli Driss Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147(3). pp.111251.
8. Голуб Г.А., Кепко О.І. Вибір структури цехів по виробництву субстратів та вирощуванню грибів. *Наук. вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. № 251. 2016. С. 183–192.
9. Golub G., Kepko O. Modelling the work of closed system of heating and ventilation of greenhouses. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 52, № 2. Pp. 85–90.
10. Golub G., Kepko O., Pushka O., Kovtuniuk Z., Kotliar T. Modeling of substrate and air temperature dynamics in the mushroom greenhouse. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 69, № 1. Pp. 315–324.

References

1. Achour, Yasmine; Ouammi, Ahmed & Zejli, Driss. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 147(3).* pp.111251. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111251 [in English].

2. Sethi, V. P., Sumathy, K., Lee, C. & Pal, D. S. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy, 96*, pp. 56–82 [in English].
3. Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M. & Fabrizio, E. (2021). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy, 288* [in English].
4. Gorobec, V. & Yatsenko, O. (2014). Development and heating systems mathematical model of heat and mass transfer in the greenhouse with alternative energy sources. *Energy and automation, 1* [in English].
5. Dudnyk, A. O. (2014). Synthesis and research of mathematical models of energy consumption for heating greenhouses in winter. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry, 194 (3),* pp. 218–222 [in English].
6. Shelestovskyi B.H., Habrusiev H.V. & Habrusieva I.Iu. (2023) Vyshcha matematyka: teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka [Higher mathematics: probability theory and mathematical statistics]. Navchalnyi posibnyk. Ternopil: SMP "Taip" [in Ukrainian].
7. Achour, Yasmine; Ouammi, Ahmed & Zejli, Driss. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 147147(3).* pp.111251 [in English].
8. Holub, H.A. & Kepko, O.I. (2016). Vybir struktury tsekhiv po vyrobnytstvu substrativ ta vyroshchuvanniu hrybiv [The choice of the structure of workshops for the production of substrates and the cultivation of mushrooms]. *Nauk. visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia: tekhnika ta enerhetyka APK – Science Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: agribusiness technology and energy, № 251*, 183–192 [in Ukrainian].
9. Golub, G. & Kepko, O. (2017). Modelling the work of closed system of heating and ventilation of greenhouses. *INMATEH – Agricultural Engineering, Vol.52, 2,* 85-90 [in English].
10. Golub G., Kepko O., Pushka O., Kovtuniuk Z. & Kotliar T. (2023). Modeling of substrate and air temperature dynamics in the mushroom greenhouse. *INMATEH – Agricultural Engineering, Vol.69, 1,* 315–324. doi:DOI: https://doi.org/10.3563 [in English].

Oleg Kepko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuriy Kovalchuk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Structural and Logic diagram of the Automatic Control System of the Closed Heating AND Ventilation System of Greenhouses

In the process of designing an automatic control system for a closed system of heating and ventilation of greenhouses with air regeneration, a structural and logical control scheme was substantiated and developed, which provides control of technological parameters (temperature, humidity, CO_2 concentration, lighting.

The structural-logical scheme was created on the basis of the technological map of the cultivation of common oyster mushrooms taking into account changes in temperature, humidity, CO_2 concentration and illumination as a function of time. As a result of the study, controlled quantities, control actions, controlled disturbing actions and uncontrolled disturbing actions were determined. The parameters and modes of operation of the device for automatic control of the closed ventilation system are substantiated. The proposed control algorithm must have memory. During the entire technological cycle, the device must remember the values of temperature, humidity, CO_2 concentration and lighting in each room and others. According to the type of memory used, the device will be synchronous, as the parameters of the automatic control device (APU) will change at the moment of arrival of synchronizing pulses. Due to the fact that some transient processes are not stable and have an oscillatory character, with the exception of illumination in our case, it is necessary to introduce a delay into the control algorithm for the response of the system to the duration of pulses. All devices and executive devices work on electricity.

Conclusions: 1. It was established that from the point of view of automatic control of the temperature of the substrate and air, the system "cultivation room – greenhouse" with a water heating system is a two-volume object. 2. The structural and logical control scheme of the closed heating and ventilation system, which provides for the control of technological parameters (temperature, humidity, CO_2 concentration, illumination) in the system, is substantiated and developed.

closed ventilation system, air regeneration, structural and logical scheme, mushroom cultivation

Одержано (Received) 13.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 663.1 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.305-311

О.О. Пархомовський, **Д.В. Трушаков,** доц., канд. техн. наук, **М.О. Федотова**, канд. техн. наук, **О.А. Козловський,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com

Модернізація та дослідження системи керування процесом ферментації опари

Статтю присвячено розробці нового методу визначення готовності ферментованого тіста в герметичному ферментаторі на основі моніторингу витрат газів з герметичного ферментатора. Було проведено детальний аналіз і визначені популярні методи виробництва хліба, зокрема, на основі методу "Біга". Дослідження було зосереджено на процесі ферментації та властивостях цього процесу.
arduino, мікроконтролер, ферментація, розробка програмного забезпечення, тісто, хліб

Постановка проблеми. Сучасні виробничі процеси надзвичайно вимагають ефективного використання часу для забезпечення високої якості продукції. Під час виготовлення хлібопекарських виробів однією з важливих стадій є ферментація тіста, яка вимагає певного часу для досягнення його оптимальної пишності. Визначити момент готовності опари до виймання з ферментатора може бути складно. В Україні на виробництвах використовуються різні підходи, включаючи менш автоматизований підхід, коли ефективність процесу ферментації залежить від досвіду оператора який відповідає за цей процес. У цьому випадку оператор вручну встановлює тривалість ферментації та налаштовує температуру і вологість у камері. Після закінчення встановленого часу ферментації, ферментатор може вимкнутися або надіслати сигнал оператору.

У зв'язку з різноманітністю впливів на процес ферментації тіста, встановлений оператором час може бути неточним. Ця неоднаковість веде до потреби в автоматизації процесу визначення готовності тіста.

Аналіз основних досліджень і публікацій. В Україні та за кордоном проведено ряд досліджень, присвячених вивченню газоутворювальної здатності борошна. На основі цих досліджень можна зробити висновок, що газоутворювальна здатність борошна є одним з найважливіших показників його якості. Вона визначає обсяг та якість готового хліба. Серед найбільш вагомих публікацій і досліджень варто виділити наступні.

У роботі [2], в якій було встановлено, що газоутворювальна здатність борошна круп'яних культур залежить від вмісту амілолітичних ферментів у ньому. Борошно з високим вмістом амілолітичних ферментів має більшу газоутворювальну здатність.

У роботі [6] є інформація про загальні відомості газоутворювальної здатності борошна. Зазначається, що газоутворювальна здатність борошна залежить від багатьох факторів, включаючи сорт борошна, його якість, вміст амілолітичних ферментів, температуру та вологість ферментації, а також кількість дріжджів.

У роботі [7] є також загальні відомості про газоутворювальну здатність борошна. Зазначається, що газоутворювальна здатність борошна є одним з найважливіших показників його якості. Вона визначає обсяг та якість готового хліба.

© О.О. Пархомовський, Д.В. Трушаков, М.О. Федотова, О.А. Козловський, 2023

Постановка завдання. Метою даного проекту є оптимізація процесу ферментації тіста на виробництві хлібу з використанням сучасних програмних засобів та інструментів вимірювання фізичних параметрів. Система, яка розробляється, повинна мати можливість динамічного налаштування через спеціальний пульт управління та бути здатною до керування з існуючого пульта управління за допомогою RS-232 інтерфейсу.

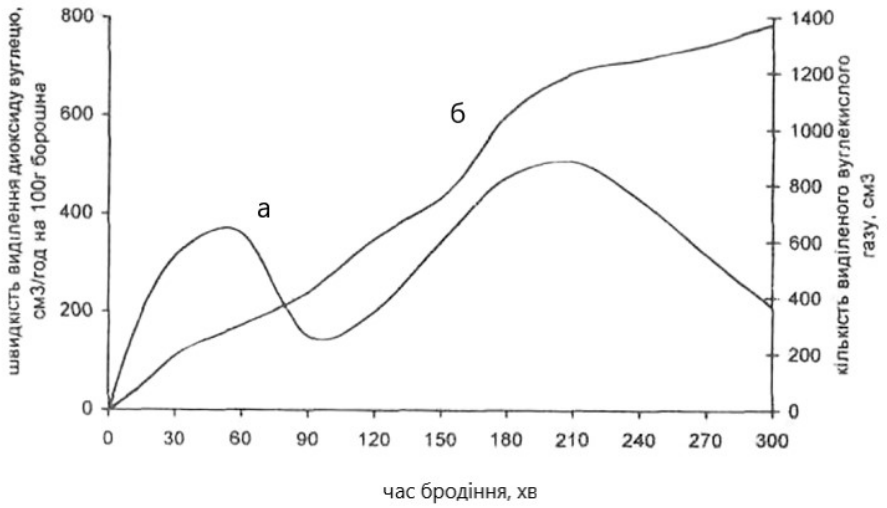
Завдання дослідження. Провести аналіз існуючих методів ферментації, визначити найефективніший серед них. Ретельно проаналізувати обрану методологію та виявити можливості її вдосконалення. Розробити автоматизовану систему керування, яка інтегрується з існуючими процесами. Забезпечити можливість налаштування та управління новою системою через пульт управління. Перевірити функціональність розробленого продукту. На підставі теоретичних досліджень розробити модернізацію існуючої системи керування герметичним ферментатором з використанням властивостей процесу ферментації.

Виклад основного матеріалу. Після проведеного аналізу літератури та існуючих досліджень було виявлено, що газоутворювальна здатність борошна залежить від наступних факторів.

1. Вміст амілолітичних ферментів. Борошно з високим вмістом амілолітичних ферментів має більшу газоутворювальну здатність. Це пов'язано з тим, що амілолітичні ферменти розщеплюють крохмаль на цукри, які є джерелом енергії для дріжджів.
2. Сорт борошна. Борошно з вищого сорту має меншу газоутворювальну здатність, ніж борошно з нижчого сорту. Це пов'язано з тим, що в борошні вищого сорту міститься менше амілолітичних ферментів.
3. Якість борошна. Борошно з доброю якістю має більшу газоутворювальну здатність, ніж борошно з поганою якістю. Це пов'язано з тим, що в борошні з доброю якістю міститься більше клейковини, яка є каркасом для утримання газу.
4. Температура та вологість ферментації. Температура та вологість ферментації впливають на активність дріжджів. При підвищеній температурі та вологості ферментації активність дріжджів збільшується, що призводить до більшої газоутворення.
5. Кількість дріжджів. Кількість дріжджів впливає на кількість газу, що утворюється в процесі ферментації. При збільшенні кількості дріжджів збільшується кількість газу.

Серед можливих методів визначення готовності опари можна виділити аналіз таких параметрів, як час, температура, газоутворення або візуальний огляд. Враховуючи ці фактори, стає можливим вдосконалення процесу виробництва та забезпечення стабільної якості хлібобулочних виробів, раціонально використовуючи час і ресурси.

У дослідженні процесу газоутворення [2] було наведено графік виділення діоксиду вуглецю ферментами (рис.1). З показників цього графіку було отримане порогове значення витісненого газу відповідно якого тісто вважається достатньо проферментованим, було створено необхідний алгоритм який розраховує порогове значення залежно від кількості тіста в ферментаторі.



а – динаміка газоутворення, *б* – загальне газоутворення за весь час

Рисунок 1 – Динаміка виділення діоксиду вуглецю в пшеничному борошні першого сорту

Джерело: [2]

Серед популярних ферментаторів був обраний BRSSF 100 (рис. 2) як потенційний зразок для модернізації. Для цього було підібрано доцільні прилади, а витрати на модернізацію одного 100-літрового ферментатора склали 10 863,30 грн.



Рисунок 2 – Ферментатор моделі BRSSF 100

Джерело: [8]

На підставі проведеного аналізу, встановлено необхідність створення системи моніторингу за витратами газу. Було розроблено функціональну схему автоматичної системи моніторингу, яку можна використати на виробництві (рис. 3).

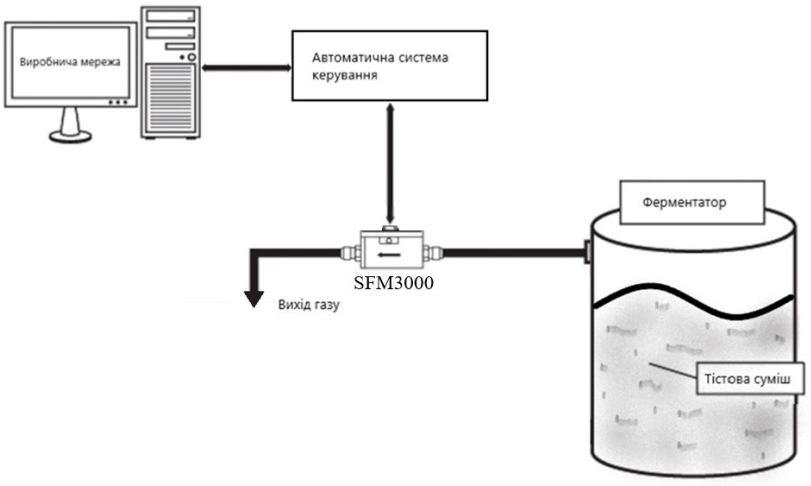


Рисунок 3 – Функциональна схема автоматичної системи моніторингу

Джерело: розроблено авторами

Розробка системи автоматичного керування була проведена з використанням програмного забезпечення Arduino IDE (рис. 4) та моделювання прототипу в віртуальному середовищі Wokwi (рис. 5). Принцип роботи системи полягає в використанні існуючої системи моніторингу витрат газу та додаткового мікроконтролера.

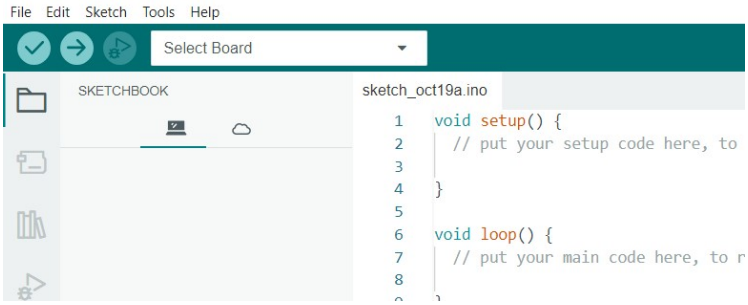


Рисунок 4 – Інтерфейс Arduino IDE

Джерело: [9]

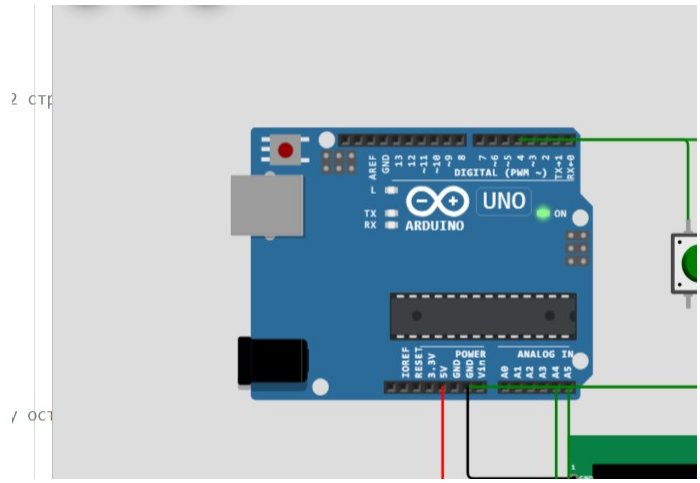


Рисунок 5 – Модель прототипу на платформі Wokwi

Джерело: розроблено авторами

Було створено систему автоматичного керування, що використовує систему моніторингу витрат газу за допомогою додаткового мікроконтролера (рис. 6).



Δ V – аналоговий сигнал залежно від потоку газу; t ° - температура внутрішньої атмосфери; φ – вологість внутрішньої атмосфери; V – кількість літрів тіста в ферментаторі

Рисунок 6 – Автоматична система керування ферментатором

Джерело: розроблено авторами

Для оптимальної роботи додаткової системи автоматичного керування герметичним ферментатором необхідні наступні матеріали: харчовий шланг; газовий витратомір SFM3000-200C; мікроконтролер R3CH340; модуль TTL-RS232 MAX3232; кабель інтерфейсний RS-232; перехідник обладнання Lucom COM(DB9)-RJ45 UTP5e F/F Assemble Kit (RS232 over TP) синій(62.09.8014); 40x Dupont (Дюпон) кабель мама-мама 20см для Arduino.

Для оптимальної роботи додаткової системи автоматичного керування герметичним ферментатором необхідно забезпечити взаємодію її компонентів. Для цього потрібно підключити харчовий шланг до системи виведення газів. Це дозволить газовому витратоміру отримувати дані про витрату газу, потім встановити газовий витратомір на шляху харчового шланга. Це забезпечить точне вимірювання витрати газу, далі з'єднати газовий витратомір з мікроконтролером через I^2Cінтерфейс. Це дозволить мікроконтролеру отримувати дані від витратоміра. Потрібно розмістити витратомір поруч із мікроконтролером на відстані не більше 3 метрів. Це забезпечить надійний зв'язок між компонентами.

Крім того необхідно встановити зв’язок з пультом управління через інтерфейс RS-232. Через велику напругу необхідний конвертер сигналів MAX3232 з’єднання якого зображено на рисунку 7.

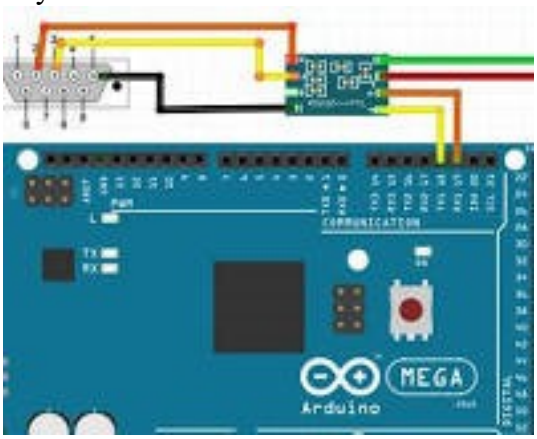


Рисунок 7 – З’єднання MAX3232 з Arduino

Джерело: розроблено авторами

Принцип роботи системи автоматичного керування полягає у наступному (рис.8). Центральний контролер збирає дані від витратоміру і пульту управління. Він обробляє ці дані, встановлює порогове значення згідно вбудованого рівняння і приймає рішення на основі вимог та налаштувань без необхідності втручання користувача. Моніторинг об'єкта проводиться за допомогою витратоміра, який періодично вимірює потік повітря та передає ці дані до центрального контролера. Центральний контролер містить два блоки - блок порівняння і блок прийняття рішень. В блоку порівняння порівнюється поточне значення з пороговим значенням регульованого параметра. На основі цього порівняння в блоку прийняття рішень вирішується, чи слід виконувати певну дію, наприклад, вимикати певний виконавчий пристрій.

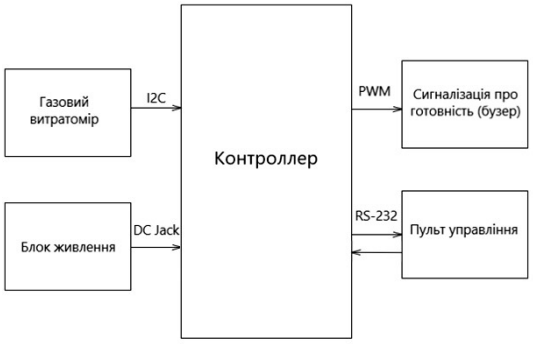


Рисунок 8 – Функціональна схема автоматичного контролю ферментацією
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Розроблена система автоматичного керування ферментатором на основі витрат газу має ряд переваг, які дозволяють підвищити ефективність виробництва хліба. За допомогою цієї системи можна точно визначати момент готовності ферментованого тіста. Ця можливість базується на інформації про те, що витрати газу є прямою функцією газоутворювальної здатності тіста, яка, у свою чергу, залежить від його якості. Завдяки цьому виробники можуть бути впевнені, що їхній хліб буде мати оптимальну пишність та якість. Крім того, система дозволяє регулювати витрати газу, що сприяє вдосконаленню продуктивності процесу ферментації, що дозволить скоротити тривалість ферментації і звільнить додаткові потужності для виробництва інших видів продукції.

Система може бути використана в ферментаторах різного об’єму. Для цього необхідно лише ввести на початку технічного процесу кількість літрів тіста, яке обробляє ферментатор. Загалом, ця модернізація системи керування ферментатором є ефективним рішенням, яке дозволяє підвищити якість та продуктивність виробництва хліба.

Список літератури

1. Мацай М.Ю. Основи біотехнології. ЛНУ ім. Тараса Шевченка, 2011 . 154 с.
2. Гетьман І.А., Михонік Л.А. Дослідження вуглеводно-амілазного комплексу борошна круп'яних культур. Національний університет харчових технологій, 2019. 47-51 с.
3. Дробот В.І., Степаненко Т.О. "Технологія хліба, кондитерських, макаронних виробів харчоконцентратів: курс лекцій денної та заочної форм навчання. Київ: НУХТ, 2006. 267 с.
4. Зайцев Г.Ф. Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління ; за ред. проф. Г.Ф. Зайцева. К.: Техніка, 2002. 688с.
5. Лазарєв М.І., Шевченко С.М., Іванова В.І. Газоутворювальна здатність пшеничного борошна різних сортів. *Хлібопекарство України*. 2022. № 2. С. 36-39.
6. Кучер В.П., Півень О.М., Зінько В.М., Загайний В.М., Кучер О.М. Біотехнологія: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: Вища школа, 2006. 432 с.
7. Лазарєв М.І., Лазарєв В.І., Іванова В.І. Хлібопекарська технологія. Київ: Навчальна книга - Богдан, 2012. 480 с.

8. Ферментатор BRSSF 100. URL: https://www.used-bakery.com/products/sourdough-fermenter-hematronic?variant=11856974577706 (дата звернення: 03.11.2023)
9. Arduino programming notebook. URL: http://engineering.nyu.edu/gk12/ampscbri/pdf/ArduinoBooks/Arduino%20Programming%20Notebook.pdf (date of application: 05.11.2023)

References

1. Matsaj, M.Yu. (2011). *Osnovy biotekhnolohii* [*Basics of biotechnology.*]. LNU im. Tarasa Shevchenka, [in Ukrainian].
2. Het'man, I.A. & Mykhonik, L.A. (2019). *Doslidzhennia vuhlevodno-amilaznoho kompleksu boroshna krup'ianykh kul'tur* [*Study of the carbohydrate-amylase complex of cereal grain flour.*]. Natsional'nyj universytet kharchovykh tekhnolohij [in Ukrainian].
3. Drobot, V.I. & Stepanenko, T.O. (2006). *Tekhnolohiia khliba, kondyters'kykh, makaronnykh vyrobiv kharchokontsentrativ : kurs lektsij* [*Technology of bread, confectionery, pasta products of food concentrates: a course of lectures*]. Kyiv: NUKhT [in Ukrainian].
4. Zajtsev, H.F., Steklov, V.K. & Brits'kyj, O.I. (2002). *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia* [*Theory of automatic control*] . H.F. Zajtseva (Eds.). Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].
5. Lazariev, M.I., Shevchenko, S.M. & Ivanova, V.I. (2022). Hazoutvoriuval'na zdatnist' pshenychnoho boroshna riznykh sortiv [Gas-forming capacity of wheat flour of different varieties]. *Khlibopekarstvo Ukrainy – Bakery of Ukraine, № 2,* 36-39 [in Ukrainian].
6. Kucher, V.P., Piven', O.M., Zin'ko, V.M., Zahajnyj, V.M. & Kucher, O.M. (2006). *Biotekhnolohiia: pidruchnyk dlia studentiv vyschykh navchal'nykh zakladiv* [*Biotechnology: a textbook for students of higher educational institutions*]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
7. Lazariev, M.I., Lazariev, V.I. & Ivanova, V.I. (2012). *Khlibopekars'ka tekhnolohiia* [*Bakery technology*]. Kyiv: Navchal'na knyha - Bohdan [in Ukrainian].
8. Fermentator BRSSF 100. *used-bakery.com.* Retrieved from https://www.used-bakery.com/products/sourdough-fermenter-hematronic?variant=11856974577706 [in Ukrainian].
9. Arduino programming notebook. *engineering.nyu.edu.* Retrieved from http://engineering.nyu.edu/gk12/ampscbri/pdf/ArduinoBooks/Arduino%20Programming%20Notebook.pdf [in English].

Oleksandr Parkhomovskyi, master's student, **Dmytro Trushakov,** Assos. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci., **Oleksandr Kozlovskyi,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University in Kropyvnytskyi, Ukraine

Modernization and Research of the Control System of the Process of Dough Fermentation

A new method for determining the readiness of fermented dough in a sealed fermenter is proposed in the article. A detailed analysis was conducted and popular bread production methods were identified, including the Biga method. The study focused on the fermentation process and its properties.

The fermentation process is an important part of bread production. It affects the texture, taste, and nutritional value of the finished bread. There are many different fermentation methods, each with its own advantages and disadvantages. In the traditional fermentation method, the dough is left on a table at room temperature. This method is simple and does not require expensive equipment. However, it can be unreliable, as the fermentation process is difficult to control. More modern fermentation methods use sealed fermenters. This allows for controlling the temperature, humidity, and oxygen level in the fermentation environment. This ensures a more uniform fermentation process and improves the quality of the finished bread. However, existing sealed fermenter systems that use timers have limitations. They cannot accurately determine the readiness of the dough. This can lead to the dough being under-fermented or over-fermented. A new method for determining the readiness of fermented dough in a sealed fermenter has been developed. This method uses a microcontroller and a gas consumption monitoring system. The microcontroller collects data on the current state of fermentation, including temperature, humidity, and oxygen level. The gas consumption monitoring system measures the amount of gas produced during fermentation. The microcontroller uses this data to determine the readiness of the dough. It does this by analyzing the fermentation rate curve.

The new method is accurate and reliable. It can be used for any type of sealed fermenter of any volume. The new method has the potential to improve the quality and consistency of bread production.

arduino, microcontroller, fermentation, software development, dough, bread

Одержано (Received) 20.11.2023 *Прорецензовано (Reviewed) 07.12.2023*
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Д.Ю. Артеменко, В.А. Онопа, О.А. Кислун, К.А. Муленко
Теоретичне обґрунтування конструктивних особливостей котка для передпосівного обробітку ґрунту 3

М. Л. Заєць
Вплив параметрів дискових сошників на передавальну здатність прорізання пожнивних решток у системі нульового обробітку ґрунту 16

В.М. Булгаков, О.М. Троханяк
Дослідження та вдосконалення запобіжних механізмів шнекових конвеєрів 23

Igor Beshlyage, Leonid Malay, Victor Popescu
Comprehensive evaluation of synthetic motor oil 32

С.П. Степаненко, О.П. Гриценко
Математичне моделювання стійкості руху асиметричної дискової борони 39

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

Г.В. Теслюк, Е.Б. Алієв, Ю.В. Теслюк
Техніко-економічне обґрунтування геометричних параметрів біонічних культиваторних лап на основі морфології риб 51

Г.М. Калетнік, В.М. Яропуд
Експериментальні дослідження ефективності функціонування систем забезпечення мікроклімату від'ємного тиску в тваринницьких приміщеннях 66

В.О. Шейченко, С.П. Коропченко, І.А. Дудніков, Ю.Б. Скоряк, Я.М. Сало
Техніко-технологічні рішення інтенсифікації перероблення конопляної сировини 85

В.М. Сало, Д.В. Богатирьов, С.М. Лещенко
Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток 93

Р.В. Кісільов, В.М. Кропівний, П.Г. Лузан, О.В. Нестеренко
Вдосконалення конструкції бітерів дозатора кормів порційної дії 110

В.Ю. Дудін, В.Б. Говоруха
Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів 112

Е.Б. Алієв, В.Ю. Дудін, М. О. Лінко
Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів 121

К.В. Васильковська, О.О. Андрієнко, В.О. Малаховська
Аналіз ефективності агродронів для внесення технологічних матеріалів в системі точного землеробства 131

С.П. Степаненко, Д.А. Волик
Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною 138

В.Ф. Дідух, І.Є. Цизь, В.В. Тарасюк, С.М. Хомич
Дослідження процесу формування у ґрунті вологоутримуючого шару 149

Ruslan Kirchuk, Lyudmila Zabrodotskaya, Taras Haponiuk, Ruslan Ferents
Experimental studies and mathematical model of the rapeseed seed drying process 158

О.А. Бурлака, А.О. Келемеш, О.В. Горбенко
Елементи організації операційних технологій в рослинництві з урахуванням аграрних ризиків 166

В.В. Кравченко, А.В. Войтік, І.О. Лісовий
Застосування мехатронних систем в системі машин для тваринництва 176

О.І. Біловод, В.В. Падалка, О.А. Бурлака
Оновлення тракторного парку Полтавської області, аналіз та перспективи 186

С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, В. Мельніченко
Дослідження впливу параметрів глибокорозпушувача та комбінації робочих органів на ефективність обробітку ґрунту 196

В.І. Ребенко, В.С. Хмельовський, В.М. Туринський
Обґрунтування форми споруди для промислового утримання кіз 208

В.А. Дейкун, В.М. Кропівний, Р.В. Москальченко
Аналіз способів посіву, перспективи вдосконалення 218

А.В. Бабій, І.В. Головецький, Ю.Б. Гладьо
Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми 227

О. Задорожній, С.М. Мороз, О.М. Васильковський
Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення 237

С.П. Степаненко, С.П. Тримбач
Математичне моделювання процесу утворення гранул із сипких матеріалів в грануляторах з кільцевою матрицею 247

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

М.М. Студент, С.І. Маркович, В.М. Гвоздецький, Х.Р. Задорожна
Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості та корозійну стійкість електродугових покриттів 256

А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.О. Магопець, В.С. Маркович
Дослідження залежності мікротвердості модифікованих поверхонь титанових сплавів від глибини насичення азотом при вакуумному іонному плазмовому азотуванні в термоциклічному режимі 264

М.І. Денисенко
Відновлення та зміцнення деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, працюючих в абразивному середовищі..... 271

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

А.О. Сергєєв, В.М. Боков, В.М. Шмельов
Удосконалення електроерозійної головки розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата з ручною подачею електрода-інструмента..... 285

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

О.І. Кепко, І.О. Лісовий, О.Ю. Ковальчук
Структурно-логічна схема автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць 294

О.О. Пархомовський, Д.В. Трушаков, М.О. Федотова, О.А. Козловський
Модернізація та дослідження системи керування процесом ферментації опари 305

CONTENT

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

Dmytro Artemenko, Volodymyr Onopa, Oleh Kyslun, Kostiantyn Mulenko
Theoretical Substantiation of the Design Features of the Roller for Pre-sowing Tillage 3

Maksym Zayets
Influence of Parameters of Disc Coulters on the Transmission Capacity of Cutting Crop Residues in the System of Zero Tillage 16

Volodymyr Bulgakov, Oleksandra Trokhanyak
Research and Improvement of Safety Mechanisms of Screw Conveyors 23

Igor Beshlyage, Leonid Malay, Victor Popescu
Comprehensive Evaluation of Synthetic Motor Oil 32

Serhii Stepanenko, Oleksandr Hrytsenko
Mathematical Modeling of the Stability of Movement of Asymmetric Disc Harrow 39

AGROENGINEERING

Hennadii Tesliuk, Elchyn Aliiev, Yuliia Tesliuk
Technical and Economic Justification of Geometric Parameters of Bionic Cultivation Tines Based on Fish Morphology 51

Hryhorii Kaletnik, Vitalii Yaropud
Experimental Studies of the Effectiveness of Systems for Providing Negative Pressure Microclimate in Livestock Premises 66

Viktor Sheychenko, Serhii Koropchenko, Ihor Dudnikov, Yuliia Skoryak, Yaroslav Salo
Technical and Technological Solutions for the Intensification of the Processing of Hemp Raw Materials 85

Vasyl Salo, Dmytro Bohatyrov, Serhii Leshchenko
Regarding the Reliability of the Technological Process of Shredding Crop Residues 93

Ruslan Kisilov, Volodymyr Kropivny, Petro Luzan, Olexsander Nesterenko
Design Improvement of Beaters Portioned Feed Dispenser 101

Volodymyr Dudin, Volodymyr Govorukha
Justification of the Structural and Technological Parameters of the Belt-screw Mixer of Loose Fodder 112

Elchyn Aliiev, Volodymyr Dudin, Mykola Linko
Results of Experimental Studies of a Small-sized Fodder Expander 121

Kateryna Vasylkovska, Olha Andriienko, Valentyna Malakhovska
Analysis of the Energy Efficiency of Agricultural Drones in the System of Precision Agriculture 131

Serhii Stepanenko, Daryna Volyk
Mathematical Modeling and the Results of Experimental Research of the Process of Density-Based Seed Separation Using Vibro-Pneumatic-Impulse Technology 138

Volodymyr Didukh, Igor Tsiz, Victor Tarasyuk, Serhii Khomych
Research of the Process of Formation of a Moisture-retaining Layer in the Soil 149

Ruslan Kirchuk, Lyudmila Zabrodotskaya, Taras Haponiuk, Ruslan Ferents
Experimental studies and mathematical model of the rapeseed seed drying process 158

Oleksii Burlaka, Anton Kelemesh, Oleksandr Gorbenko
Elements of the Organization of Operational Technologies in Crop Production Considering Agrarian Risks 166

Vasyl Kravchenko, AndriiVoitik, Ivan Lisovyi
Application of Mechatronic Systems in the System of Machines for Animal Husbandry 176

Oleksandra Bilovod, Viacheslav Padalka, Oleksii Burlaka
Update of the Tractor Park of the Poltava Region, Analysis and Perspectives 186

Serhii Leshchenko, Vasyl Salo, Dmytro Petrenko, Olexiy Vasylkovskyi, Viktor Melnychenko
Research on of the Influence of Deep Tiller Parameters and Combination of Operating Parts on Soil Cultivation Efficiency 196

Victor Rebenko, VasylKhmelovskyi, Vasyl Turinskyi
Substantiation of the Building Form for Industrial Goat Keeping 208

Viktor Deikun, VolodymyrKropivnyy, Roman Moskalchenko
Analysis of Sowing Methods, Prospects for Improvement 218

Andrii Babii, Ivan Holovetskyi, Yurii Hlado
Research of Kinematic Parameters of the Vibrating Ploughshare of a Potato Digger Using a Computer Program 227

Oleksii Zadorozhnii, Serhii Moroz, Oleksii Vasylkovskyi
Analysis of Designs the Cleaning Devices of Gravity Sieves With Oscillating Movement of the Sievestate of General-Purpose Graincleaning Machines 237

Serhii Stepanenko, Serhii Trimbach
Mathematical Modeling of the Process of Forming Granules From Bulk Materials in Ring Matrix Granulators 247

MATERIALS SCIENCE

Mykhailo Student, Sergiy Markovych, Volodymyr Hvozdetskii, Khrystyna Zadopozna
Research on the Dependence of the Microhardness of Modified Surfaces of Titanium Alloys on the Depth of Nitrogen Saturation During Vacuum Ion Plasma Nitriding in the Thermocyclic Mode 256

Anatoly Rutkovskiy, Sergiy Markovych, Sergiy Magopec, Viktor Markovych
Research on the Dependence of the Microhardness of Modified Surfaces of Titanium Alloys on the Depth of Nitrogen Saturation During Vacuum Ion Plasma Nitriding in the Thermocyclic Mode 264

Mykola Denysenko
Restoration and Strengthening of Parts and Tool of Agricultural Machinery Operating in an Abrasive Environment 271

APPLIED MECHANICS

Anton Sergeev, Viktor Bokov, Vitaly Shmelov
Improvement of the EDM Head for Dimensional Processing With an Arc on the Basis of a Desktop Drilling Machine With Manual Feeding of the Electrode-Tool 285

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Oleg Kepko, Ivan Lisovyi, Yuriy Kovalchuk
Structural and Logic Diagram of the Automatic Control System of the Closed Heating AND Ventilation System of Greenhouses 294

Oleksandr Parkhomovskyi, Dmytro Trushakov, Marianna Fedotova, Oleksandr Kozlovskyi
Modernization and Research of the Control System of the Process of Dough Fermentation 305