**Петренко Д.І.**

к.т.н., доцент

Аулін В.В.

д.т.н. професор

Мачок Ю.В.

к.т.н., доцент

Нестеренко О.В.

к.т.н., доцент

**Центральноукраїнський
національний технічний
університет****Petrenko D.**

Ph.D., Associate Professor

Aulin V.Doctor of Technical Sciences,
Professor**Machok Yu.**

Ph.D., Associate Professor

Nesterenko O.

Ph.D., Associate Professor

**Central Ukrainian National
Technical University****УДК 631.331; 631.33.024.2****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-12****ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
НАРАЛЬНИКА ПОЛОЗОВИДНОГО
СОШНИКА**

Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі сучасної сільськогосподарської інженерії – підвищенню ефективності функціонування робочих органів посівних машин шляхом теоретичного обґрунтування оптимальних геометричних параметрів наральника полозовидного сошника. У роботі проведено комплексний аналіз існуючих конструкцій сошників (дискових, анкерних та полозовидних), у результаті якого виявлено основні недоліки традиційних полозовидних моделей, зокрема нестабільність глибини загортання насіння та ефект виглиблювання при підвищенні робочої швидкості агрегату понад 7...9 км/год.

Науково доведено, що найбільш доцільною формою фронтальної грані наральника, яка забезпечує стабільність технологічного процесу, є логарифмічна спіраль. Використання такої геометрії дозволяє підтримувати сталий кут різання незалежно від коливань глибини занурення робочого органу в ґрунт, що мінімізує лобовий опір та запобігає зминанню рослинних решток і забиванню сошника. В ході дослідження застосовано математичний апарат механіки суцільних середовищ, зокрема модель граничної рівноваги Мора-Кулона та теорію розширення порожнин Весіча, для опису взаємодії носка з різними типами ґрунтів (піщаними, суглинковими та чорноземами).

Встановлено, що оптимальний кут заходження наральника в діапазоні 25°...32° забезпечує реалізацію ефекту «чистого зсуву» замість енерговитратного зминання ґрунтового пласта. Теоретично обґрунтовано, що запропонований логарифмічний профіль сприяє самоочищенню робочої поверхні навіть на ґрунтах із підвищеною вологістю, оскільки виникаючі сили зсуву значно перевищують сили адгезії та тертя. Математичне моделювання підтвердило, що оптимізація форми наральника дозволяє знизити тяговий опір сошника на 10%...12%, забезпечуючи при цьому рівномірне формування насіннєвого ложа та дотримання заданої глибини висіву. Результати дослідження мають практичне значення для проектування енергоефективних посівних комплексів нового покоління, здатних працювати на високих швидкостях із дотриманням агротехнічних вимог.

Ключові слова: наральник, полозовидний сошник, логарифмічна спіраль, математичний аналіз.

Постановка проблеми. Серед основних проблем сучасного землеробства можемо виділити і таку, як необхідність підвищення робочої швидкості сівалок при збереженні високої якості насіннєвого ложа. За операцію утворення посівного ложа відповідає сошник, модельний ряд яких весь час розширюється в процесі розвитку основ землеробської механіки [1, 2, 5].

Проте, за загальноприйнятою класифікацією [1, 2] сошники розрізняють за кутом взаємодії з ґрунтом: з тупим і гострим кутом входження, серед яких найбільш характерними є сошники наступних типів.

Дисковий, який добре працює по пожнивних рештках, характеризується високою швидкістю посіву, проте не формує ущільнене



дно борозни та на підвищених швидкостях сприяє виносу насіння за межі борозни на агротехнічно недопустиму величину [3, 4-6]. Для усунення зазначених недоліків конструкцію даного типу сошників ускладнюють додатковими елементами у вигляді ущільнюючої і заспокійливої п'яти, напрямників тощо, що призводить до ускладнення конструкції. Крім того, диски таких сошників є активними елементами, що передбачають наявність підшипникових вузлів, що разом зі складністю конструкції зменшує загальну надійність системи.

Анкерні сошники [1, 4] відзначаються стабільною роботою на будь-яку глибину на важких і переущільнених ґрунтах [5-7], але викликають посилене розпушування ґрунту зі значним виносом вологого ґрунту на поверхню. Крім того, такий тип сошника прагне до постійного заглиблення, що призводить до нестабільної глибини утворення борозни, а тому потребує додаткових елементів для стабілізації ходу сошника.

Полозовидні сошники (на відміну від дискового) працює за принципом ковзання та переважаючою деформацією зминання і бокового витіснення ґрунту, що створює специфічні умови взаємодії з ґрунтом [3, 5, 9, 11]. Носок наральника полозовидного сошника тисне на ґрунт, руйнуючи великі пори та створюючи щільне ложе, що є критично важливим і для підтягування капілярної води з глибинних шарів до насінини. При цьому конструкцією таких сошників добре копіюється рельєф поля та забезпечується агротехнічно стабільна глибина заробки насіння. Проте, даний тип сошників має і ряд недоліків, зокрема чутливість до наявності рослинних решток, високий тяговий опір на великих швидкостях та труднощі з заглибленням на важких і переущільнених ґрунтах. При збільшенні швидкості агрегату понад 7...9 км/год традиційний полозовидний сошник починає виглиблюватись з ґрунту внаслідок того, що реакція ґрунту на лобову частину (носок) зростає пропорційно квадрату швидкості [9, 11-13].

Зважаючи на переваги полозовидних сошників, для усунення їх недоліків потрібно акцентувати увагу на вдосконаленні форми носка полоса з метою забезпечення стабільної роботи на різноманітних фонах, в тому числі і важких.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Пошуком найбільш ефективної форми наральника полозовидних сошників займались ряд вчених, які досліджували як реологічні властивості взаємодії робочих органів з ґрунтом, так і енергоємність процесів.

Зокрема, роботи [3, 6] присвячені обґрунтуванню параметрів робочих органів для забезпечення рівномірності глибини загортання, у дослідженнях [4, 7, 13] приділено увагу

комбінованим кутам входження (гострим та тупим) для покращення самозаглиблення та формування ущільненого ложа. Оскільки носок сошника працює в умовах інтенсивного абразивного зношування, що призводить до зміни його конфігурації, важливими є роботи щодо дослідження даного питання у працях [10, 11], де досліджено вплив зміни конфігурації наральника полосовидного сошника внаслідок зношеності на тяговий опір.

Сучасний підхід до формування конфігурації наральника полягає у використанні змінного кута: носок має бути гострим на вході ($15^\circ \dots 18^\circ$) для забезпечення заглиблення, а далі переходити у тупіший кут для формування стінок борозни [6, 8, 13].

Натомість, дослідження наральників з параболічною лобовою частиною [8, 9, 14] дозволили встановити, що при використанні даної конфігурації «плавно» нарощується тиск на дно борозни, що запобігає миттєвому руйнуванню структури ґрунту, зберігаючи капілярну структуру.

В праці [15] активно досліджується біонічна форма носка, а результати експериментів [6] показали, що нанесення мікрорельєфу на носок полосовидного сошника створює повітряний прошарок або знижує площу фактичного контакту з ґрунтом, що дозволяє знизити залипання на вологих ґрунтах.

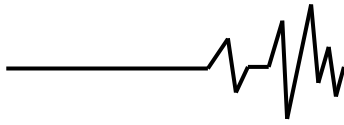
Незважаючи на ґрунтовні дослідження, залишається ряд питань, які потребують додаткового вивчення в сучасних умовах, зокрема динамічна нестабільність на високих швидкостях, що пов'язано з виникненням критичного зростання лобового опору на швидкостях понад 10 км/год, що призводить до «стрибкоподібного» руху сошника та нерівномірності глибини посіву. Недостатньо досліджено, як саме зміна кривизни носка впливає на реологічні властивості ґрунту з позиції найменшого спротиву до деформації.

Таким чином, необхідним є обґрунтування такої форми носка наральника полосовидного сошника, яка забезпечувала б ефект різання ґрунтового середовища з мінімальними енерговитратами при забезпеченні агротехнічних вимог до формування насінневого ложа.

Постановка завдання. Обґрунтування конфігурації носка наральника полосовидного сошника шляхом теоретичного дослідження його взаємодії з ґрунтовым середовищем через призму механіки суцільних середовищ.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до класичної моделі роботи сошника, можна розділити його на три функціональні зони: носок (зона розрізання), щоки (зона деформації) та п'ята (зона формування ложа) [1, 2, 12, 13].

Носок працює як криволінійний клин. Головний недолік сошників з прямолінійним або



круговим профілем, які використовуються на традиційних сошниках – зміна кута різання при зміні глибини ходу або при коливаннях сівалки [11-14]. Даний недолік можливо усунути, якщо використати кривизну носка у вигляді логарифмічної спіралі, для якої характерним є сталість кута різання для будь-якої точки кривої. Це означає, що за будь-якої глибини занурення h та будь-якого кута тяги сошника, умови розрізання ґрунту та взаємодія з рослинними рештками будуть ідентичними [14, 16].

Для універсальності використовуємо рівняння логарифмічної спіралі, де кут між радіус-вектором r і дотичною α є сталим [16]:

$$r = a \cdot e^{\theta \cdot \operatorname{ctg}(\alpha)} \quad (1)$$

де a – початковий радіус-вектор;

α – кут між радіус-вектором і дотичною до кривої в будь-якій її точці (кут заходження);

θ – полярний кут (кут повороту).

Опір розрізанню ґрунту описується рівнянням Горячкіна, адаптованим для криволінійного профілю полозовидного сошника [2, 11]:

$$R_{cut} = k \cdot h \cdot b + \varepsilon \cdot h \cdot b \cdot g^2 \quad (2)$$

де R_{cut} – сила опору різанню;

k – питомий опір розрізанню;

h, b – глибина та ширина занурення робочого органу;

ε – коефіцієнт, що враховує динамічний опір (залежить від щільності ґрунту);

g – швидкість руху.

Величина a визначає відстань від полюса (центра спіралі) до точки на кривій при

нульовому куті повороту, тобто при $\theta = 0$. При цьому, кут заходження α відповідає за якість розрізання, а параметр a впливає на кривизну K :

$$K = \frac{1}{r \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2(\alpha)}}, \quad (3)$$

звідси при малих a носок має крутіший вигин, що зручно для компактних сошників, але може призвести до швидшого зносу через високу концентрацію напружень на малій площі; натомість при великих a крива стає більш пологою, що зменшує питомий тиск на ґрунт і покращує плавність ходу, але збільшує металоємність конструкції.

При виборі геометричного параметру початкового радіуса спіралі a_{geom} необхідно користуватись міркуваннями, щоб робоча довжина кривої була достатньою для забезпечення необхідної технологічної глибини ходу сошника h_{tech} (з формули Горячкіна) (рис.

1). Робоча глибина h_{tech} є проекцією частини спіралі на вертикальну вісь. Щоб сошник працював стабільно, має виконуватися умова:

$$a_{geom}(\theta, \alpha) \geq h_{tech}. \quad (4)$$

Для детального математичного аналізу взаємодії носка сошника з ґрунтом скористаємося моделлю граничної рівноваги середовища Мора-Кулона та кінематикою переміщення криволінійного профілю в пружно-пластичному середовищі.

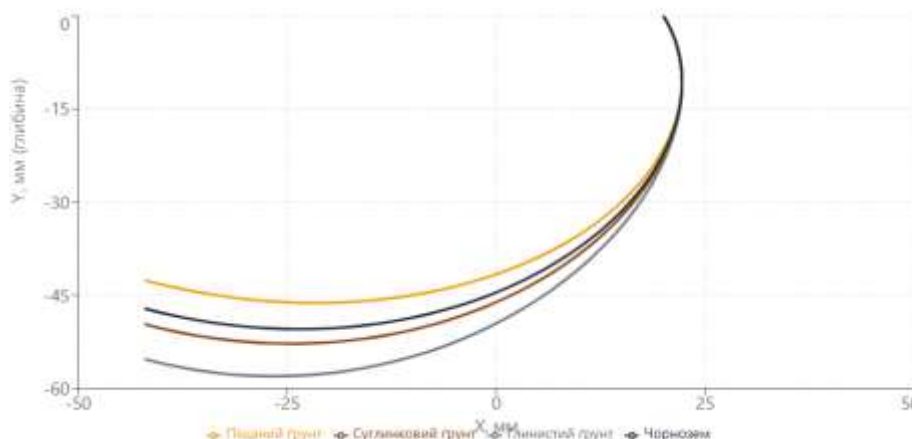
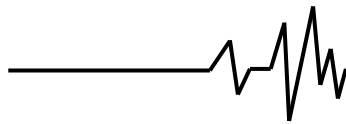


Рис. 1. Порівняння оптимальних профілів носка сошника для різних ґрунтів: піщаний $\psi=32^\circ$; суглинковий $\psi=28^\circ$; глинистий $\psi=22^\circ$; чорнозем $\psi=26^\circ$



Розглянемо елементарну ділянку носка dS . На неї діють нормальна сила тиску dN та сила тертя dF . Згідно з законом тертя:

$$dF = dN \cdot \operatorname{tg}(\delta) + C_a \cdot dS, \quad (5)$$

де C_a – питома сила зчеплення ґрунту з поверхнею (адгезія).

Для криволінійного профілю горизонтальна складова сили опору дорівнює:

$$P_x = \int_0^h [p(z) \cdot (\sin(\alpha) + f \cdot \cos(\alpha))] \cdot b \cdot dz, \quad (6)$$

де $p(z)$ – тиск ґрунту на глибині z ;

$f = \operatorname{tg}(\delta)$ – коефіцієнт тертя.

Щоб сошник не виглиблювався, вертикальна складова сили реакції R_z повинна бути спрямована вниз. Це досягається, коли кут нахилу дотичної в будь-якій точці α задовольняє умову:

$$\alpha < 90^\circ - (\delta + \psi + \beta_{\max}), \quad (7)$$

де δ – кут тертя ґрунту об матеріал сошника;

ψ – кут внутрішнього тертя ґрунтового середовища, який для представленої моделі дозволяє врахувати, що перед носком сошника на вологих і важких ґрунтах утворюється так звана «зона стиснутого ядра» (ґрунтовий клин);

$\beta_{\max}$ – кут, який визначає напрямок вектора тяги відносно горизонталі.

Для реальних ґрунтів ($\delta \approx 20^\circ \dots 35^\circ$) при $\alpha > 40^\circ$ виникає ефект виглиблення сошника, що вимагає значного баластного вантажу. Кут $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$ забезпечує стабільне заглиблення навіть на ущільнених ґрунтах (рис. 1).

Щоб сошник не забивався рослинними рештками, останні повинні ковзати вздовж носка і перерізатися, а не зминатися перед ним. Умова ковзання:

$$\alpha < 90^\circ - \phi_{\text{res}}, \quad (8)$$

де ϕ_{res} – кут тертя рослинних решток об сталь ($\phi_{\text{res}} \approx 30^\circ \dots 40^\circ$).

Таким чином, кут $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$ забезпечує виконання умови самоочищення носка від рослинних решток.

Для детального опису пружно-пластичної деформації ґрунту при взаємодії з логарифмічним

носком сошника використаємо модель граничної рівноваги Терецагі-Прандтля, адаптовану до криволінійного профілю [14, 17, 18].

При заглибленні носка ґрунт не просто розсувається, а проходить через стадії пружного стиснення, зсуву та пластичної текучості.

Згідно механіки зон деформації (модель Прандтля) при русі сошника з профілем логарифмічної спіралі в ґрунті формуються три основні зони напруженого стану:

- зона пружного ядра, як утворюється безпосередньо під носком. Завдяки сталому куту α , ґрунт у цій зоні перебуває в стані всебічного стиснення, що запобігає його передчасному руйнуванню (кришенню).

- зона пластичних зсувів, де виконується умова граничної рівноваги Мора-Кулона. Траєкторії зсуву ґрунту самі мають форму логарифмічних спіралей, що ідеально узгоджується з формою носка.

- зона викиду, відповідно до якої поверхневий шар деформується вгору.

Для опису напружень використовується функція напруження σ , яка залежить від характеристик ґрунту:

$$\sigma = f(c, \chi, E), \quad (9)$$

де c – питома сила зчеплення ґрунтового середовища (когезія);

χ – кут внутрішнього тертя середовища;

E – модуль пружності (деформації).

Відповідно до теорії граничної рівноваги, граничний опір ґрунту під криволінійним носком можемо визначити як:

$$q = c \cdot N_c + \gamma \cdot h \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot b \cdot N_\gamma, \quad (10)$$

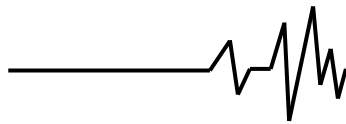
де N_q , N_c , N_γ – безрозмірні коефіцієнти несучої здатності ґрунтового середовища, що залежать від кута заходження α та внутрішнього тертя χ ;

b – ширина робочого органу, який безпосередньо взаємодіє з ґрунтом;

γ – питома вага ґрунту.

Розглянемо здатність ґрунту чинити опір різним видам внутрішніх деформацій (за Терецагі, Прандтлем та Рейсснером) [18, 19].

Коефіцієнт впливу перевантаження N_q визначає, як опір ґрунту під носком сошника зростає залежно від ваги шару ґрунту, що знаходиться вище, тобто це опір, який сошник долає, щоб підняти або розсунути товщу ґрунту



над собою – чим глибше йде сошник, тим сильніше цей опір:

$$N_q = \frac{e^{2\pi(0,75 - \chi/360) \cdot \text{tg}(\chi)}}{2 \cdot \cos^2(45 + \chi/2)} \quad (11)$$

Коефіцієнт впливу зчеплення (когезії) N_c дозволяє врахувати внесок внутрішніх сил зв'язності ґрунту (сили притягання між частинками) в загальний опір, саме цей опір характеризує здатність робочого органу до безпосередньо розрізання та розриву зв'язків у ґрунті:

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \text{ctg}(\chi) \quad (12)$$

Коефіцієнт впливу власної ваги ґрунту N_γ дозволяє врахувати опір, що виникає через необхідність переміщення об'єму ґрунту під робочим органом у зоні зсуву. Найбільш характерним для важких, ущільнених ґрунтів та глин, де опір власної ваги частинок ґрунту при їх зміщенні є значним, враховуючи також форму полозовидного сошника, оскільки краще враховує бічне розпирання ґрунту, є формула Весіча [18, 19], яка враховує, що зона зсуву під інструментом має виражену радіальну форму:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \cdot \text{tg}(\chi) \quad (13)$$

У класичній моделі Весіча передбачається, що тиск діє вертикально. У нашому випадку тиск передається під кутом α . Тому резонно трансформувати складники рівняння, вводючи коефіцієнти нахилу навантаження (i_c , i_q , i_γ), які описують вплив кута заходження α :

$$q = c \cdot N_c \cdot i_c + \gamma \cdot h \cdot N_q \cdot i_q + \frac{1}{2} \gamma \cdot b \cdot N_\gamma \cdot i_\gamma \quad (14)$$

Згідно з теорією Гансена та Весіча, коефіцієнти нахилу навантаження для робочого органу, що працює під кутом, розраховуються через кут відхилення сили від нормалі.

Таким чином, можемо записати, що: величина коефіцієнта для перевантаження:

$$i_q = \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 \quad (15)$$

коефіцієнт для зчеплення:

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q \cdot \text{tg}(\chi)} \quad (16)$$

коефіцієнт для власної ваги:

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{\alpha}{\chi}\right)^2 \quad (17)$$

Тут важливо зауважити, що при $\alpha > \chi$, ґрунт почне накопичуватися перед сошником (так званий «ефект застійної зони»), і величина кута власної ваги i_γ різко зростає. При

прийнятому куті $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$ це дозволяє мінімізувати енергію на переміщення маси ґрунту, оскільки при $\alpha < \chi$ деформація ґрунту переходить із фази «змінання» у фазу «чистого зсуву» (рис. 2).

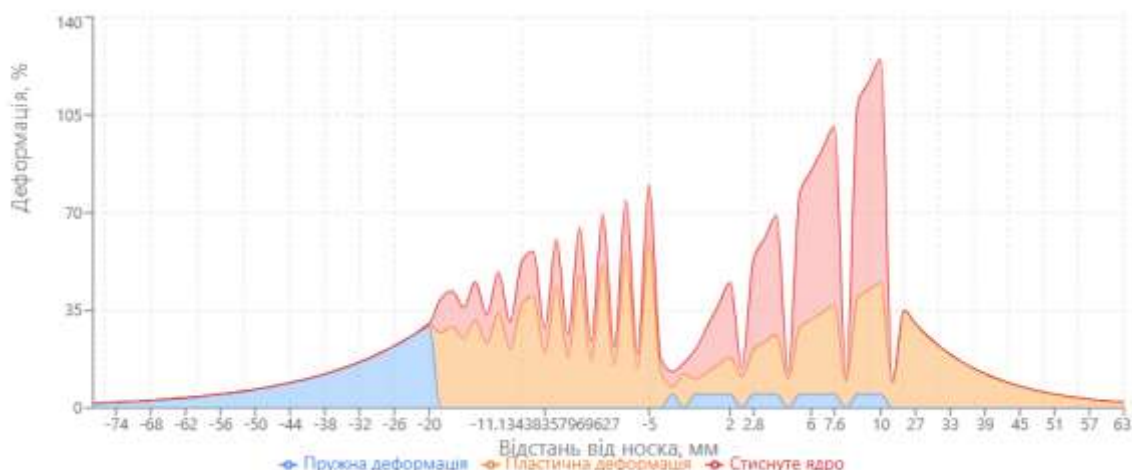
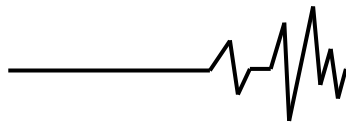


Рис. 2. Зони деформації ґрунту (модель Терцагі-Прандтля) при взаємодії з носком сошника: кут заходження $\alpha = 28^\circ$, початковий радіус $a = 15$ мм, глибина ходу $h = 60$ мм, швидкість $v = 1,5$ м/с



Використання моделі Весіча дозволяє нам математично довести універсальність сошника (табл. 1). Таким чином, на піщаних ґрунтах ($c \approx 0$) матимемо найбільшу вираженість доданку N_q . Тут опір лінійно залежить від глибини h , а завдяки оптимізації кута α на рівні 25° , ми реалізуємо мінімізацію площі зони зсуву, знижуючи енерговитрати.

Натомість на глинистих ґрунтах (мале внутрішнє тертя та висока когезія) спостерігаємо більш значний вплив коефіцієнту N_c . При цьому, форма сошника забезпечує «ріжучий» ефект, що дозволяє руйнувати структуру ґрунту при менших значеннях q , ніж у класичних клинів.

Таблиця 1 – Співвідношення між пружною та пластичною складовими деформації для різних типів ґрунтів

Тип ґрунту	Основний параметр	Поведінка при $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$	Результат деформації
Піщані (легкі)	Високий χ , низьке C	Деформація переважно пластична, зсув відбувається миттєво	Мінімальний опір, чиста борозна
Суглинки (середні)	Збалансовані C та χ	Оптимальне поєднання пружного стиснення та зсуву	Формується ідеально ущільнене ложе
Глинисті (важкі)	Високе C , низький χ	Переважає пружна деформація та адгезія (налипання).	Кут 25° забезпечує різання замість давлення.

Як відомо [5, 12], налипання ґрунту змінює геометрію сошника, перетворюючи ідеальний логарифмічний профіль на випадкову форму, що різко підвищує опір. Розглянемо модель адгезійної взаємодії та самоочищення, яка критично важлива для роботи на вологих, важких ґрунтах.

Взаємодія вологого ґрунту з металом описується законом Дерягіна для адгезії:

$$F_{ad} = S \cdot (C_a + p \cdot \operatorname{tg}(\delta)), \quad (18)$$

де S – площа контакту;

p – нормальний тиск на поверхню.

Умова, при якій частинка ґрунту почне ковзати вздовж носка (самоочищуватися), а не переміщуватись (налипати) разом з ним:

$$F_{shift} \succ F_{fric} + F_{ad}, \quad (19)$$

де F_{shift} – зсувна сила, яка є проекцією сили тяги на дотичну до логарифмічної спіралі:

$$F_{shift} = P \cdot \cos(\alpha), \quad (20)$$

P – сила опору ґрунту;

F_{fric} – сила зовнішнього тертя:

$$F_{fric} = N \cdot \operatorname{tg}(\delta), \quad (21)$$

N – нормальна сила тиску.

Зважаючи на це, можемо вивести критичний коефіцієнт адгезії, який здатний подолати запропонований сошник:

$$a_{ad} \prec \frac{P \cdot (\cos(\alpha) - \sin(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(\delta))}{S}. \quad (22)$$

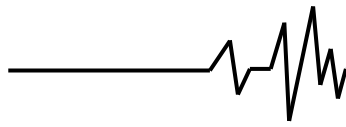
Таким чином, обґрунтований вище кут носка дозволяє сошнику працювати на ґрунтах з вологістю на 15-20% вище за критичну для стандартних сошників. Це досягається за рахунок того, що вектор зсуву спрямований майже паралельно поверхні металу, що максимізує механічне зрізання адгезійного шару самими частинками ґрунту, що рухаються повз.

Виконаємо енергетичний аналіз з огляду на роботу з деформації ґрунту. Сумарна енергія W , що витрачається носком, складається з:

$$W = W_{elast} + W_{plast} + W_{fric}. \quad (23)$$

Для детальшого енергетичного аналізу ми розкладемо загальну роботу W на складові, інтегруючи параметри логарифмічного носка та фізико-механічні властивості ґрунту. Енергетичний баланс взаємодії носка з ґрунтом на одиницю шляху (1 п.м.) виглядає наступним чином.

Робота пружної деформації W_{elast} витрачається на попереднє стиснення ґрунту перед його руйнуванням. Вона частково повертається системі у вигляді сили релаксації, що закриває борозну:



$$W_{elast} = \int_0^V \frac{(q \cdot \sin(\alpha))^2}{2E} dV, (24)$$

де q – граничне напруження згідно моделі Весіча;

V – об'єм ґрунту, що зазнає пружного стиснення.

Робота пластичної деформації W_{plast} є основною частиною витрат енергії на

$$W_{plast} = \int_0^h \left[c \cdot N_c \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 + \gamma \cdot h \cdot N_q \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2 \right] \cdot b \cdot dh. (26)$$

Енергія, що витрачається на подолання тертя ґрунту об поверхню сошника:

$$W_{fric} = \int_0^L q \cdot b \cdot \operatorname{tg}(\delta) \cdot \cos(\alpha) \cdot dL, (27)$$

де L – довжина дуги логарифмічної спіралі, яка контактує з ґрунтом:

$$L = \frac{r_{\max} - a}{\cos(\alpha)}. (28)$$

Для логарифмічної спіралі робота тертя залежить від інтеграла нормального тиску вздовж усієї контактної дуги:

незворотне руйнування структури ґрунту, його розрізання та зсув:

$$W_{plac} = \left[c \cdot N_c \cdot i_c(\alpha) + \gamma \cdot h \cdot N_q \cdot i_q(\alpha) \right] \cdot \varepsilon_p \cdot b; (25)$$

або, якщо завдяки логарифмічному профілю, ми інтегруємо роботу на кожній ділянці кривої dl :

$$W_{fric} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} q \cdot b \cdot \operatorname{tg}(\delta) \cdot a \cdot e^{\theta \cdot \operatorname{ctg}(\alpha)} \cdot d\theta. (29)$$

Повна енергетична модель, враховуючи вплив кута носка леза полозовидного сошника:

$$W_{total(\alpha)} = \frac{(q \cdot \sin(\alpha))^2}{2E} V + q \cdot \varepsilon_p \cdot b + q \cdot b \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot \operatorname{tg}(\delta). (30)$$

Це класична оптимізаційна задача, за результатами якої можемо зробити наступні висновки (рис. 3):

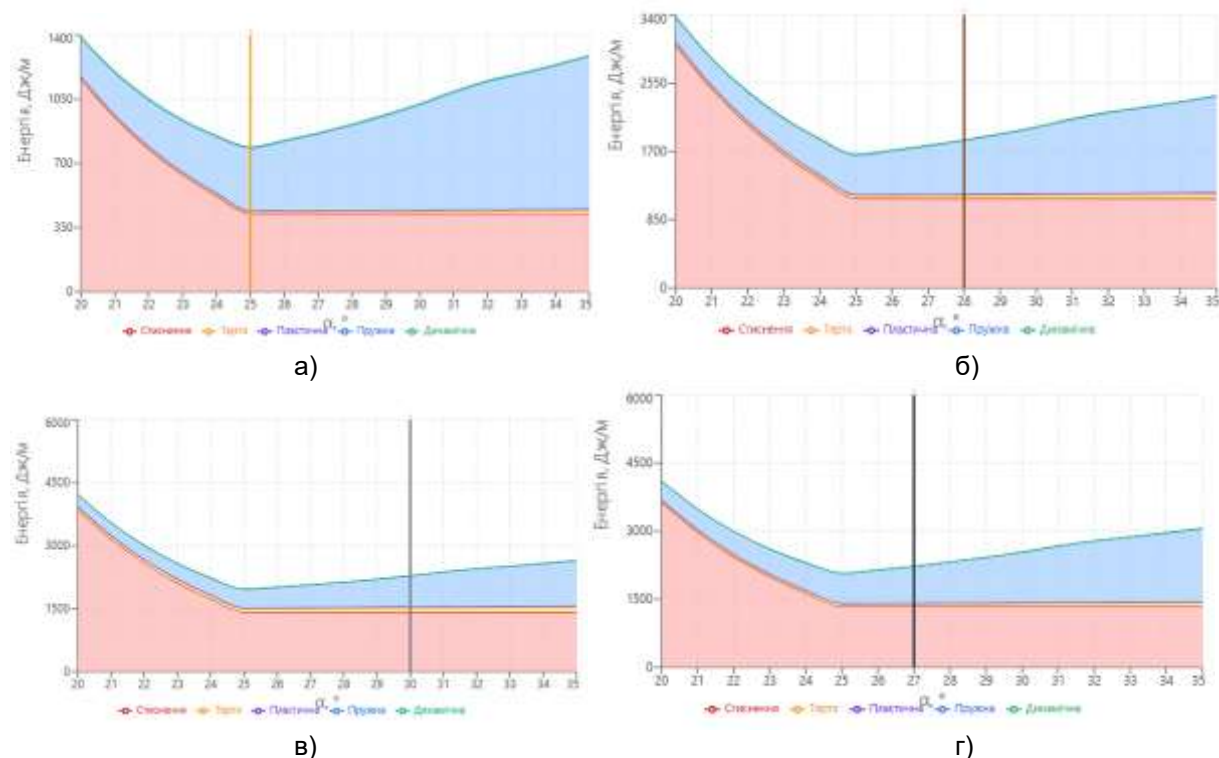
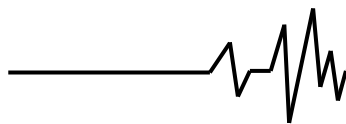


Рис. 3. Розподіл енергії, що витрачається на роботу сошника у ґрунті залежно від кута заходження носка леза та типу ґрунту: а) піщаний; б) суглинок; в) глинистий; г) чорнозем



- при $\alpha < 20^\circ$ різко зростає довжина носка L та площа контакту, що призводить до домінування W_{fric} , тоді робота на подолання тертя є визначальною, і внаслідок зношення робочих елементів буде все більш суттєво збільшувати енергоємність процесу;

- при $\alpha > 30^\circ$ експоненціально зростає W_{plast} через збільшення лобового опору i_q та формування зони стиснутого ядра (рис. 2).

Таким чином, функція $W_{total}(\alpha)$ має локальний оптимум саме в діапазоні $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$ для більшості типів сільськогосподарських ґрунтів України.

Висновки. На основі аналізу механіки руйнування ґрунту доведено, що ідеальною формою фронтальної грані є логарифмічна спіраль, як дозволяє забезпечити сталий кут різання незалежно від глибини ходу h , який залежно від типу ґрунту знаходиться в діапазоні $\alpha = 25^\circ \dots 30^\circ$. При даному значенні α вектор сили опору ґрунту R забезпечує самозаглиблення сошника. Це мінімізує тяговий опір P_x та запобігає зминанню рослинних решток.

Шляхом використання моделі Весіча теоретично доведено універсальність полозовидного сошника, формою фронтальної грані якого є логарифмічна спіраль. Так, на піщаних ґрунтах опір лінійно залежить від глибини h , а завдяки оптимізації кута α на рівні 25° , реалізується мінімізація площі зони зсуву, знижуючи енерговитрати. Натомість на глинистих ґрунтах форма сошника забезпечує «ріжучий» ефект, що дозволяє руйнувати структуру ґрунту при менших значеннях q , ніж у класичних клинів.

Універсальність для різних типів ґрунтів також досягається через керування нормальним тиском p . Форма носка гарантує, що зсувна сила завжди перевищує силу адгезії, що виключає налипання вологого ґрунту та деформацію робочого профілю.

Таким чином, підтверджено, що запропонована конструкція сошника є енергоефективною (зменшення P_x на $10\% \dots 12\%$) та агротехнічно доцільною, оскільки забезпечує формування стабільної глибини висіву на будь-яких типах ґрунтів.

Список використаних джерел

1. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький :

Лисенко В.Ф., 2022. 220 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307> (дата звернення: 15.12.2025).

2. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник / Д. Г. Войтюк, Л. В. Аніскевич, В. М. Барановський та ін. ; за ред. Д. Г. Войтюка. 2-ге вид., перероб. та допов. Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2019. 508 с.

3. Artemenko D., Leshchenko S., Onopa V., Majara V., Deikun V. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2022. Vol. 24, No. 4. P. 57–71. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947> (дата звернення: 15.12.2025).

4. Порівняльні показники роботи сошників двох типів / В. М. Сало, С. М. Лещенко, Б. Г. Вовнянко, С. М. Мороз. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2024. Вип. 54. С. 160–167. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167>.

5. No-tillage Seeding in Conservation Agriculture / ed. by C. J. Baker, K. E. Saxton. FAO and CAB International, 2007. 326 p.

6. Zhang X., Li H., Du R., Ma S., He J., Wang Q., Chen W., Zheng Z., Zhang Z. Effects of key design parameters of tine furrow opener on soil seedbed properties. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016. Vol. 9, No. 3. P. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160903.2259>.

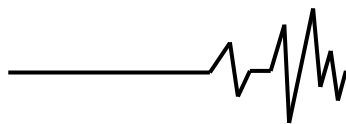
7. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин / А. І. Бойко, М. О. Свірень, С. І. Шмат, М. М. Ножнов. Київ, 2003. 206 с.

8. Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters / A. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, K. Sharai, A. Babi, M. Stashkiv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 1 (100). P. 33–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174445>.

9. Бойко А. І., Свірень М. О. Дослідження зусиль, які діють на робочу частину наральникових сошників. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. Кіровоград, 2006. Вип. 17. С. 3–14.

10. Аулін В. В. Стан самоорганізації середовища ґрунту та закономірності зносу робочих органів ґрунтообробних машин. *Проблеми трибології*. 2013. № 1. С. 114–119.

11. Мачок Ю. В., Сало В. М., Лузан П. Г. Аналіз взаємодії вертикально розміщеного ґрунторізного елементу сошника з ґрунтовым середовищем. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського*



господарства ім. П. Василенка. 2015. Вип. 156. С. 12–18.

12. Технологічні основи проектування та виготовлення посівних машин : монографія / Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, Ю. Ф. Павельчук, В. М. Пришляк, І. І. Чвартацький, М. Л. Заяць, Р. І. Лотоцький. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 238 с.

13. Артеменко Д. Ю. Дослідження конструкційних параметрів елементів сошника для посіву просапних культур. *Науково-технічні дослідження у галузі механічної інженерії та транспорту : колективна монографія*. Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2023. С. 72–109.

14. Ковбаса В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Київ, 2006. 35 с.

15. Biomimetic design of soil-engaging components: a review / Z. Xu, H. Qi, P. Gao, S. Wang, X. Liu, Y. Ma. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, No. 6. Art. 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9060358>.

16. Бідніченко О. Г. Логарифмічна спіраль як геометрична форма та її природне і практичне застосування. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2025. № 108. С. 3–17.

17. Прикладна механіка : навч. посіб. / В. М. Булгаков, В. В. Адамчук, О. М. Черниш, М. Г. Березовий, Г. М. Калетнік, В. В. Яременко. Київ : Аграрна наука, 2016. 816 с.

18. Калюх Ю. І., Клименков О. А., Берчун Я. О. Прикладна реалізація моделей ґрунтового середовища в геотехніці: від моделі біо до моделі граничної рівноваги. *Математичне моделювання в економіці*. 2016. № 3-4. С. 75–101.

19. Механіка ґрунтів : підручник / О. М. Шашенко, В. Г. Шаповал, С. М. Гапеев та ін. ; за ред. О. М. Шашенка. 3-тє вид., переробл. і доп. Дніпро : НТУ «ДП», 2024. 339 с.

References

1. Salo, V., Leshchenko, S., Luzan, P., & Salo, L. (2022). Mashyny dlia sivby, sadinnia ta dohliadu za posivamy [Machines for sowing, planting and tending crops: Tutorial]. Lysenko V. F. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307>

2. Voitiuk, D. H., Aniskevych, L. V., Baranovskyi, V. M. et al. (2019). Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural machines. Fundamentals of theory and calculation] (D. H. Voitiuk, Ed.; 2nd ed.). Naukovo-metodychnyi tsentr VFPO.

3. Artemenko, D., Leshchenko, S., Onopa, V., Majara, V., & Deikun, V. (2022). Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering*

International: CIGR Journal, 24(4), 57–71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>.

4. Salo, V. M., Leshchenko, S. M., Vovnianko, B. H., & Moroz, S. M. (2024). Porivnialni pokaznyky roboty soshnykiv dvokh typiv [Comparative performance of two types of coulter]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (54), 160–167. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167>.

5. Baker, C. J., & Saxton, K. E. (Eds.). (2007). *No-tillage seeding in conservation agriculture* (2nd ed.). FAO & CAB International.

6. Zhang, X., Li, H., Du, R., Ma, S., He, J., Wang, Q., Chen, W., Zheng, Z., & Zhang, Z. (2016). Effects of key design parameters of tine furrow opener on soil seedbed properties. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(3), 67–80. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160903.2259>.

7. Boiko, A. I., Sviren, M. O., Shmat, S. I., & Nozhnov, M. M. (2003). *Novi konstruktсии gruntoobrobnykh ta posivnykh mashyn* [New designs of tillage and sowing machines]. K.

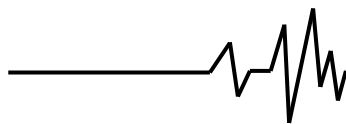
8. Nanka, A., Morozov, I., Morozov, V., Krekot, M., Poliakov, A., Kiralhazi, I., Lohvynenko, M., Sharai, K., Babiy, A., & Stashkiv, M. (2019). Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1) (100), 33–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174445>

9. Boiko, A. I., & Sviren, M. O. (2006). Doslidzhennia zusyl yakidiut na robochu chastynu naralnykovykh soshnykiv [Study of forces acting on the working part of runner coulters]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (17), 3–14.

10. Aulin, V. V. (2013). Stan samoorhanizatsii seredovyshcha gruntu ta zakonmironosti znosu robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn [The state of self-organization of the soil environment and patterns of wear of working parts of tillage machines]. *Problemy trybolohii*, (1), 114–119.

11. Machok, Yu. V., Salo, V. M., & Luzan, P. H. (2015). Analiz vzayemodiyi vertykalno rozmishchenoho hruntorizalnoho elementu soshnyka z hruntovym seredovyschem [Analysis of interaction of vertically placed soil-cutting element of the coulter with the soil environment]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka «Mekhanizatsiya silskohospodarskoho vyrobnytstva»*, (156), 12–18.

12. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Pavelchuk, Yu. F., Pryshliak, V. M., Chvartatskyi, I. I., Zaiats, M. L., & Lototskyi, R. I. (2014). *Tekhnolohichni osnovy proektuvannia ta*



vyhotovlennia posivnykh mashyn [Technological bases of design and manufacture of sowing machines]. Vydavnytstvo TNTU imeni Ivana Puliuia.

13. Artemenko, D. Yu. (2023). Doslidzhennia konstruktivnykh parametriv elementiv soshnyka dlia posivu prosapnykh kultur [Research of constructional parameters of coulter elements for sowing row crops]. In *Naukovo-tekhniczni doslidzhennia u haluzi mekhanichnoi inzhenerii ta transportu: kolektyvna monohrafiia* (pp. 72–109). Vydavets Kushnir H. M.

14. Kovbasa, V. P. (2006). *Mekhaniko-tehnologichne obgruntuvannia optymizatsii vzayemodii robochykh orhaniv z gruntom* [Mechanical and technological substantiation of optimization of interaction of working bodies with soil] [Doctoral dissertation abstract]. K.

15. Xu, Z., Qi, H., Gao, P., Wang, S., Liu, X., & Ma, Y. (2024). Biomimetic design of soil-engaging components: A review. *Biomimetics*, 9(6), Article 358. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9060358>.

16. Bidnichenko, O. H. (2025). Loharyfmichna spiral yak heometrychna forma ta yii pryrodne i praktyчне zastosuvannia [Logarithmic spiral as a geometric form and its natural and practical application]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, (108), 3–17.

17. Bulhakov, V. M., Adamchuk, V. V., Chernysh, O. M., Berezovyi, M. H., Kaletnik, H. M., & Yaremenko, V. V. (2016). *Prykladna mekhanika* [Applied mechanics]. Agrarna nauka.

18. Kaliukh, Yu. I., Klymenkov, O. A., & Berchun, Ya. O. (2016). Prykladna realizatsiia modelei gruntovoho seredovyscha v heotekhnitsi: vid modeli bio do modeli hranychnoi rivnovahy [Applied implementation of soil environment models in geotechnics: From the Biot model to the limit equilibrium model]. *Matematychni modeliuвання v ekonomitsi*, (3-4), 75–101.

19. Shashenko, O. M., Shapoval, V. H., Hapieiev, S. M., Skobenko, O. V., & Khoziaikina, N. V. (2024). *Mekhanika gruntiv* [Soil mechanics] (O. M. Shashenko, Ed.; 3rd ed.). NTU "DP".

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A SKID COLTER

The article is devoted to solving an urgent scientific and practical problem in modern agricultural engineering – increasing the efficiency of sowing machine working elements by theoretically substantiating the optimal geometric parameters of a skid-type coulter point. The study provides a comprehensive analysis of existing coulter designs (disc, anchor, and skid-type), which revealed the main drawbacks of traditional models, particularly the instability of seed placement depth and the self-lifting effect when the operating speed increases above 7...9 km/h.

It has been scientifically proven that a logarithmic spiral is the most appropriate form for the frontal face of the coulter point to ensure process stability. This geometry allows for a constant cutting angle regardless of fluctuations in the operating depth, minimizing frontal resistance and preventing the crushing of plant residues or clogging. The study employed the mathematical apparatus of continuum mechanics, specifically the Mohr-Coulomb limit equilibrium model and Vesic's cavity expansion theory, to describe the interaction of the coulter tip with various soil types (sandy, loamy, and chernozem).

It was established that an optimal entry angle in the range of 25°...32° ensures a "pure shear" effect instead of energy-consuming soil compaction. It is theoretically substantiated that the proposed logarithmic profile facilitates self-cleaning of the working surface even on high-moisture soils, as the resulting shear forces significantly exceed adhesion and friction forces. Mathematical modeling confirmed that optimizing the point's shape reduces the draft resistance of the coulter by 10%...12% while ensuring uniform seedbed formation and compliance with the specified sowing depth. The results are of practical significance for designing new-generation energy-efficient sowing complexes capable of high-speed operation while meeting agrotechnical requirements.

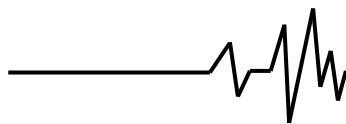
Key words: coulter point, skid colter, logarithmic spiral, mathematical analysis.

Відомості про авторів

Петренко Дмитро Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет (ЦНТУ, пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com).

Аулін Віктор Васильович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет ((ЦНТУ, пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com).

Мачок Юрій Вікторович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний



університет (ЦНТУ, пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5328-7859>, e-mail: machokuv@ukr.net).

Нестеренко Олександр Вікторович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет (ЦНТУ, пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, Україна, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6297-8555>, e-mail: nov_78@ukr.net).

Petrenko Dmytro – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetsky, Kropivnitsky, Ukraine, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com).

Aulin Victor – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetsky, Kropivnitsky, Ukraine, 25006, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: aulinvv@gmail.com).

Machok Yurii – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetsky, Kropivnitsky, Ukraine, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5328-7859>, e-mail: machokuv@ukr.net).

Nesterenko Olexsander – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetsky, Kropivnitsky, Ukraine, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6297-8555>, e-mail: nov_78@ukr.net).

Стаття надійшла 27.11.2025

Стаття прийнята 09.12.2025

Опубліковано 25.12.2025.