

РОЗРОБКА І ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НА КОПРУСАХ ПЛУГА ПНЕВМОРОЗПУШУВАЧІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІЇ

Єрмаков Сергій Володимирович

завідувач навчально-наукової лабораторії «DAK GPS»

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-6840-5309

ermkov@gmail.com

Дуганець Віктор Іванович

доктор педагогічних наук, професор

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-3383-5907

ermkov@gmail.com

Олексійко Сергій Леонідович

асистент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-3092-6790

ermkov@gmail.com

Вільчинська Дарія Володимирівна

кандидат сільськогосподарських наук

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-3322-6722

ermkov@gmail.com

Пукас Віталій Леонідович

кандидат технічних наук, доцент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-0083-7359

ermkov@gmail.com

У статті проаналізовано сучасні тенденції вирішення проблеми енергоресурсного заощадження при виконанні операцій з обробітку ґрунту. В роботі встановлено емпіричне завдання розробити механізм забезпечення вібрацій на корпусах плуга та виявити загальні теоретичні залежності коливальної дії вібророзпушувачів на тяговий опір агрегату. Запропоновано удосконалення плуга встановленням додаткового пневматичного розпушувача ґрунту у лемеші. За рахунок цього зменшиться нерівномірність і максимальні відхилення опору ґрунту, що підвищить надійність і довговічність корпусів і в цілому плуга. Для виведення залежностей тягового опору від дії вібрацій було адаптовано раціональну формулу В.П. Горячкіна. Для врахування у ній дії вібрацій було проведено аналіз досліджень вітчизняних і зарубіжних науковців на предмет впливу вібрацій на коефіцієнт тертя f_0 і питомий тяговий опір K . Середні дані було взято при побудові у даній роботі теоретичних залежностей для плуга з застосуванням пневматичних розпушувачів вібраційної дії. Приведений графік залежності тягового опору від швидкості руху при різній глибині обробітку для традиційних агрегатів і агрегатів з застосуванням ґрунторозпушувачів вібраційної дії в цілому по загальному вигляду і значенням відповідає подібним графікам тягового опору наведеними іншими науковцями. Виявлено, що застосування вібрацій знижує теоретично розрахований тяговий опір плуга в діапазоні швидкостей 0,5–2,5 м/с на 19–23%. Причому на нижчих швидкостях руху вплив вібрацій має більше значення: зменшення тягового опору на 22–23% на швидкості 0,5 м/с та на 19–20% при 2,5 м/с, що цілком корелюється з даними цілого ряду інших досліджень. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку основних характеристик та параметрів віброплугів, як на стадіях їх проектування чи конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: плуг, пневмомолоток, пневматичний розпушувач ґрунту, корпус плуга, тяговий опір, коефіцієнт тертя, вібрація.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.5>

Вступ. Перехід вітчизняного сільськогосподарського товаровиробника на вищий виробничий рівень передбачає перегляд проблеми зниження енергетичних витрат,

підвищення якості виконуваних технологічних операцій, ефективності застосування сучасної сільськогосподарської техніки. В результаті обстановки, що склалася

у світі пов'язаної з постійним подорожчанням енергоресурсів, питання про їх економію стало дуже актуальним, особливо в сільському господарстві. В наш час розробляється безліч шляхів вирішення цієї проблеми, одним з таких шляхів є зниження енергоємності при обробці ґрунту, оскільки ця операція є однією з найбільш енерговитратних у сільському господарстві.

На технологічні операції з обробки ґрунту, як правило, припадає до 40% усіх виробничих витрат, тому вдосконалення технології ґрунтообробки є завданням значимим і першорядним. Через швидкий розвиток науково-технічного прогресу економія ресурсів має супроводжуватися абсолютно новим поглядом, спрямованим на покращення якості обробки ґрунту. У науковому середовищі позначилися два основні напрямки вирішення проблеми енергоресурсного заощадження при виконанні операцій з обробки ґрунту:

- зниження тягового опору;
- розробка широкозахватних комбінованих машин.

Найбільш значущим рішенням актуального завдання вважаємо напрямком щодо зниження тягового опору ґрунтообробних машин, оскільки створенню комбінованих широкозахватних машин неминуче супроводжує проблема збільшення тягового опору знарядь.

Аналіз наукових праць показав, що домогтися зниження тягового опору ґрунтообробних машин можна кількома способами (Goryachkin, 1965; Bendera et al., 2011; Duganets et al., 2021, Adamchuk et al., 2004; Mudryk et al., 2017; Szabo et al., 1998; Hutsol et al., 2021):

- удосконаленням конструкції знаряддя та зниженням його ваги;
- удосконаленням геометрії робочих органів;
- зниженням сил тертя ґрунту про поверхню робочих органів (заміною поверхонь ковзання поверхнями кочення; коливаннями робочих органів).

Головним завданням удосконалення ґрунтообробних машин, у тому числі комбінованих, є зниження їхнього тягового опору без значного ускладнення конструкції. Особливу увагу фахівці приділяють застосуванню вібрації при обробці ґрунту, що є найбільш енергоємною операцією сучасного сільськогосподарського виробництва. Використання вібраційної та імпульсної техніки у вирішенні поставленої задачі дозволяє по-новому поглянути на процес концентрування енергії в часі та більш раціонального її витрачання при виконанні технологічних операцій з обробки ґрунту.

Матеріали і методи досліджень. В роботі встановлено емпіричне завдання розробити механізм забезпечення вібрацій на корпусах плуга та виявити загальні теоретичні залежності коливальної дії вібророзпушувачів на тяговий опір агрегату. Необхідність удосконалення існуючих технічних засобів були обґрунтовані аналізом існуючих проблем пов'язаних з глибоким обробком ґрунту і наявних технічних засобів. Розробка корпусу плуга з пневморозпушувачами вібраційної дії здійснювалась на основі даного аналізу і синтезу найкращих рішень з виявленням і усуненням їх недоліків. Закономірність зміни необхідної сили тяги із зміною умов роботи плуга повинна, природно, впливати із загальної і точної теорії,

яка об'єднує дуже складний процес, що здійснюється обладнанням для оранки. На думку Ловейкіна В.С., Човнюка Ю.В., Дяченко Л.А. (Loveikin et al., 2012) розрахункові формули для визначення тягового опору віброплугів повинні бути засновані на уточненні та вдосконаленні відомої тричленної формули В.П. Горячкіна.

$$P=f_0 G+K a b+\epsilon a b u^2$$

де P – тяговий опір ґрунтообробного знаряддя, Н; f_0 – коефіцієнт пропорційності, який залежить від загального коефіцієнта тертя; за даними В.П. Горячкіна $f_0 = 0,5$ для стернища, $f_0 = 1,0$ для конюшинища; G – вага машини, Н; K – питомий опір плуга; $K = 20000$ Н/м² на легких; $K = 30000$ Н/м² на середніх; $K = 40000$ – 50000 Н/м² на важких ґрунтах; a, b – ширина захвату і глибина обробки; ϵ – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри і фрикційні властивості робочих органів ґрунтообробної машини, $\epsilon=1500$ – 2000 Н*с²/м²; u – швидкість руху агрегату, м/с. (Goryachkin, 1965)

Раціональна формула В.П. Горячкіна є у певному сенсі спробою визначити віхи до встановлення закономірності, що шукається, і відобразити фізичний зв'язок між головними факторами робочого процесу плуга і загальним опором, який виникає при його роботі. Формула В.П. Горячкіна широко відома. Однак вона не враховує безпосередньо вплив на тяговий опір плуга (в т. ч. з вібраційними компонентами) сил тертя польових дошок зі стінкою борозни, вертикальної складової реакції ґрунту на робочі поверхні корпусів плугів, сил опору відрізанню скиб від дна і стінки борозни, товщини лез лемешів, тощо.

Результати. На підставі аналізу існуючих технічних засобів для обробки ґрунту пропонується удосконалення відомого корпусу плуга, суть якого полягає в тому, що стискуванню і зсуву частинок ґрунту випереджає його розпушування. Це реалізується за допомогою використання енергії стисненого повітря пневмосистеми, яка органічно входить в конструкцію трактора, але через відсутність споживачів безпосереднього відбору стисненого повітря недостатньо використовується в процесі його експлуатації.

Удосконалений корпус 6 (рис. 1) включає стійку 7 із закріпленими на ній полицею 8 з передньою частиною і польовою дошкою 10. На лемеші 9 додатково встановлений розпушувач ґрунту – пневмомолоток 12 (патент України № 107117).

Корпуси 6 з пневмомолотками 12 закріплені на рамі 5 плуга і за допомогою гнучких пневмоліній 4 з'єднані з повітророзподільним механізмом 11, а через спільну пневмолінію 3 і механізм 2 пневматичного керування ступенем розпушування сполучені зі штатною пневмосистемою 1 трактора.

Під час руху трактора з плугом при ввімкненому механізмі 11 пневматичного керування робочі органи пневматичних молотків 12 всіх корпусів 8, здійснюючи зворотно-поступальний рух по ходу трактора, віброударними будуть розпушувати ґрунт будь-яких категорій, зменшуючи опір його руйнування лемешами. В результаті зменшиться загальний опір переміщення орного

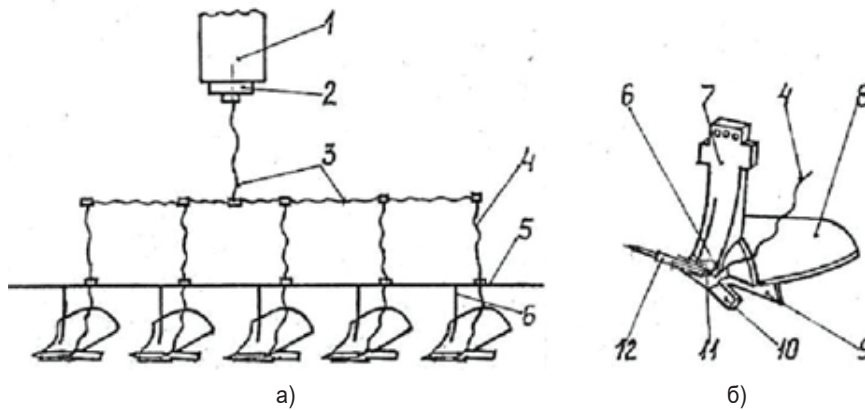


Рис. 1. Схема плуга з пневматичними розпушувачами ґрунту:

а) загальна; б) корпусу; 1 – пневматична система трактора; 2 – механізм керування ступенем розпушування ґрунту; 3 – спільна пневмолінія; 4 – пневмолінія корпусу; 5 – рама; 6 – корпус; 7 – стійка; 8 – полиця; 9 – леміш; 10 – польова дошка; 11 – повітророзподільний механізм; 12 – пневмомолоток

агрегату і навантаження на дизель, забезпечуючи його роботу на номінальному швидкісному і навантажувальному режимах.

Первинна оцінка тричленної формули В.П. Горячкіна дозволяє зробити деякі припущення. Перший член формули виражає «мертвий опір», який визначається при протягуванні плуга у відкритій борозні, тому при дії вібрацій цей опір очевидно буде зменшуватись. Другий член виражає опір, зумовлений деформацією скиби (Voitiuk, 2005; Zaika, 2011) і залежить від питомого опору K , на який теж буде впливати дія вібрацій. Третя складова загального опору пов'язана з наданням кінетичної енергії часточкам скиби залежно від швидкості руху плуга (Voitiuk, 2008). Як зазначає Ловеїкін В.С. для віброплуга, який працює на традиційній швидкості ($v=1,2\dots 1,4$ м/с), цей третій член формули відносно невеликий (~5% загального тягового опору), тому сила тяги віброплуга незначно змінюється від зміни швидкості віброплуга (Loveikin et al., 2012).

Таким чином, для оцінки впливу вібрацій на роботу плуга важливо в першу чергу простежити їх вплив на показники f_0 і K та на сумарний тяговий опір. Ці показники встановлюються переважно дослідним шляхом і їх результати описані в багатьох працях.

Різними дослідниками доведено, що вібрації є ефективним способом зменшення тяги при збільшенні об'єму збуреного ґрунту. Зокрема Х. Dong та ін. (Dong et al., 2022) довели, що при частоті вібрацій 6,7 і 8,3 Гц, необхідна тягова сила ґрунторозпушувача була стабільною та значно зниженою, що може покращити ефективність розпушування ґрунту та зменшити шкідливу вібрацію на трактор. Odey Simon та ін. (2018) оцінили тяговий опір вібраційного глибокорозпушувача та невібраційної роботи на глибині 0,35 м для вібраційного глибокорозпушувача на 6,9% – на 17% менше, ніж у невібраційного. Досліди Хіруї також підтвердили, що глибокорозпушувач з використанням коливального обладнання потребує меншого тягового опору порівняно з традиційними на 16–28%. (Xirui et al., 2016).

В.М. Булгаков, М.О. Свірень та ін. експериментально встановили, що при використанні вібрацій в плугах

значно зменшується тертя ковзання ґрунту по лемешу і полиці, що є основною складовою в загальній величині тягового опору (Bulhakov et al., 2012; Bulhakov et al., 2015). Зменшується також і залипання робочих органів. На легких і середніх ґрунтах тяговий опір зменшується на 20–30%, а на особливо важких – більше ніж на 50% (при оптимальних режимах вібрації).

Багато дослідників відзначають, що велика глибина обробки не тільки призводить до збільшення споживання енергії та поганої якості роботи ґрунтової машини, але також легко спричинити пошкодження машин та знарядь у важких умовах. Цю проблему можна вирішити методами біоніки та вібрації (Sun J. et al., 2018; Ma X. et al., 2020; Li J. et al., 2020). Дослідження в польовому експерименті з глибоким обробітком Yang M. (Yang et al., 2023) показали, що опір ґрунту поступово зменшувався зі збільшенням частоти вібрації. Застосування вібрацій робочих органів дозволяло не тільки зменшити опір, але й зменшити загальне споживання енергії: швидкість зниження опору досягла 14,2–21,2%, а загальне споживання енергії було зменшено на 11,2–16,5%. За дослідженнями Василенка В.В. за впливу вібрації на кут і коефіцієнт тертя ґрунту набуває значень відповідно $f = 0,61$ без вібрації і $f = 0,50$ з вібрацією поверхні тертя. За їх висновками вібрація може зменшити коефіцієнт тертя на 18% (Vasilenko et al., 2018). Ловеїкін В.С. та ін. зазначають, що завдяки вібраціям цей показник знижується до $f = 0,3$ для стерні (з 0,5 у В.П. Горячкіна) та до $f = 0,5\dots 0,54$ для конюшинища (1,0 у В.П. Горячкіна), тобто на 40–45% (Loveikin et al., 2012).

Опираючись на наведені дані для моделювання тягового опору плуга відповідно до формули В.П. Горячкіна використовуватимемо $f_0 = 0,5$ без вібрацій і $f_0 = 0,3$ з вібраціями (стернище), та питомий опір відповідно $K = 50000$ Н/м² і $K=40000$ Н/м² з вібраціями (суглинисті ґрунти). Інші складові формули В.П. Горячкіна прийматимемо сталими. $G = 1100$ Н, $b = 5 \cdot 0,35 = 1,75$ м, (п'ятикорпусний плуг); $\epsilon = 1500$ Н*с²/м²

Графік залежності тягового опору від швидкості руху v будемо повторювати тричі на глибині обробітку

$a = 0,25; 0,30; 0,35$ м. Діапазон змінної u приймемо в межах 0,5–2,5 м/с.

В результаті отримуємо графік (рис. 2), який наочно показує позитивний вплив вібрацій на загальний тяговий опір плуга.

Обговорення. Приведений графік залежності тягового опору від швидкості руху при різній глибині обробітки для традиційних агрегатів і агрегатів з застосуванням ґрунторозпушувачів вібраційної дії в цілому по загальному вигляду і значенням відповідає подібним графікам тягового опору наведеними іншими науковцями. Зокрема про такий вид графіків подають довідкові джерела та навчальні посібники Бендери І.М. (2011), Войтюка Д.Г. (2005; 2008), Заїки П.М. (2011) та ін. Також подібну форму мають графіки побудовані на польових дослідженнях, наприклад Ловейкіна В.С., Човнюка Ю.В. (2012), Василенка В.В. (2018) та ін. В усіх цих джерелах графіки залежності тягового опору від швидкості є зростаючими і дещо ввігнутими як і в нашому випадку.

Аналізуючи графіки на предмет ефективності дії вібрацій можна відмітити, що застосування вібрацій знижує теоретично розрахований тяговий опір плуга в діапазоні швидкостей 0,5–2,5 м/с на 19–23%. Причому на нижчих швидкостях руху вплив вібрацій має більше значення: зменшення тягового опору на 22–23% на швидкості 0,5 м/с та на 19–20% при 2,5 м/с.

Якщо порівняти ці цифри з даними, які наводять інші науковці то матимемо зменшення тягового опору від дії вібрації за даними Simon O. становить – 17%, Xirui – 16–18%, Булгакова В.М., Свірень М.О. – 20–30% (2015) Yang M. – 14,2–21,2% (2023), Василенка В.В., Афоничева – 18% (2018). Ці цифри також цілком корелюються з отриманими в результаті отриманих теоретичних кривих.

Висновки. Застосування запропонованого корпусу з пневматичним розпушувачем ґрунту на плугах орних агрегатів є перспективним і екологічно безпечним. Зменшення загального опору переміщення підвищить швидкість руху агрегата, а отже, його продуктивність. Можливість переходу дизеля на оптимальні швидкісні і навантажувальні режими роботи підвищить його вихідні експлуатаційні технікоекономічні показники, а також стабільність завантаження штатної пневмосистеми трактора відбором стисненого повітря на привод пневматичних молотків. У результаті зменшиться нерівномірність і максимальні відхилення опору ґрунту, що підвищить надійність і довговічність корпусів і в цілому плуга. Створяться певні зручності і покращаться умови праці за рахунок вилучення потреби переобладнання плуга на важких ґрунтах, шляхом знімання з нього заднього корпусу.

Порівнюючи отримані теоретичні результати можна зробити висновок, що спостерігається значне зниження теоретичного тягового опору ґрунтообробного знаряддя

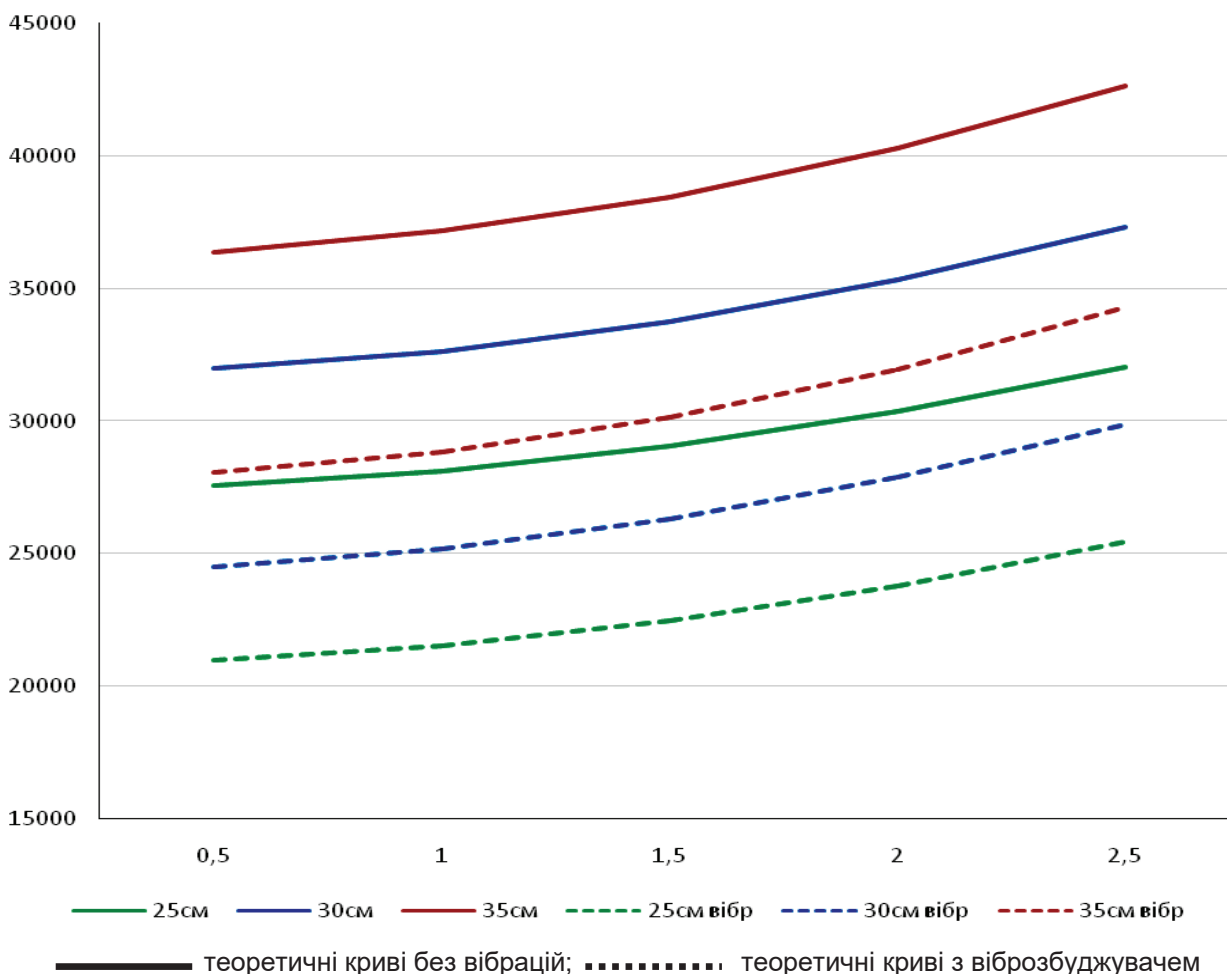


Рис. 2. Залежність тягового опору від швидкості руху при різній глибині обробітки

з вібраційними робочими органами в порівнянні з традиційним. Сформована модель умов роботи ґрунтообробного знаряддя дозволяє оцінювати ефективність застосування вібророзпушувачів на зменшення тягового опору агрегату, що підтверджується графіками, які цілком відповідають аналогічним залежностям з інших досліджень.

Використання вібраційних робочих органів на ґрунтообробних знаряддях дозволить використовувати сільськогосподарську техніку з найменшими експлуатаційними.

Застосування вібрацій знижує теоретично розрахований тяговий опір плуга в діапазоні швидкостей 0,5–2,5 м/с на 19–23 %. Причому на нижчих швидкостях руху вплив вібрацій має більше значення: зменшення тягового опору на 22–23 % на швидкості 0,5 м/с та на 19–20 % при 2,5 м/с.

Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку основних характеристик та параметрів віброплугів, як на стадіях їх проектування / конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

Бібліографічні посилання:

1. Adamchuk V.V., Baranov H.L., Baranovskyi O.S. Suchasni tendentsii rozvytku konstrukttsii silskohospodarskoi tekhniki – [Modern trends in the development of constructions of agricultural machinery]. Kyiv : Ahrarna nauka, 2004. [in Ukrainian]

2. Bendera I.M., Rozdorozhniuk P.I., Tkach O.V. Proektuvannia mekhanizovanykh tekhnolohichnykh protsesiv u roslynnytstvi – [Design of mechanized technological processes in crop production] : navch. pos. z vykonannia diplomnykh proektiv z mekhanizatsii roslynnytstva na osvithno-kvalifikatsiinomu rivni "Bakalavr". Kamianets-Podilskiy : FOP Sysyn O.V., 2011. 556 p. [in Ukrainian]

3. Bulhakov V.M., Sviren M.O., Kisilov R.V., Oryshchenko S.B., Lisovyi I.O. Doslidzhennia vibratsiinykh protsesiv pry osnovnomu obrobitku ґрунту – [Research of vibrational processes during the main cultivation of the soil]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*. 2015. Vyp. 5. T. 1. P. 3–13. [in Ukrainian]

4. Bulhakov V.M., Sviren M.O., Palamarchuk I.P., Dryha V.V., Chernysh O.M., Yaremenko V.V. Vibratsiini mashyny silskohospodarskoho vyrobnytstva – [Vibrating machines for agricultural production] : monohrafiia. Kirovohrad : KOD, 2012. 512 p. [in Ukrainian]

5. Dong X., Zheng H., Su C., Li Y., Song J., Wang J. Test And Analysis Of Vibration Characteristics Of Vibration Subsoiler INMATEH. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 68. No. 3. P. 906–917. doi: 10.35633/inmateh-68-90

6. Duganets V.I., Yermakov S.V., Oleksiuko S.L., Maysus V.V. Ohliad dyskovykh znariad dlia obrobitku hruntu – [Overview of disk tools for tillage]. *Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects*. 2021. P. 34–40. [in Ukrainian]

7. Duhanets V.I., Oleksiiko S.L., Yermakov S.V., Pukas V.L. Udoskonalennia konstrukttsii korpusu pluha z pnevmatychnymy rozpushuvachamy ґрунту – [Improvement of the design of the plow body with pneumatic soil looseners]. *Science and innovation of modern world*. London, United Kingdom : Cognum Publishing House, 2023. P. 20–25. [in Ukrainian]

8. Dziedzic K., Łapczyńska-Kordon B., Mudryk K. Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix viminalis* L.). *Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation*. 2017. Vol. 1.

9. Goryachkin V.P. Sobranie sochineniy. U 3-h tomah – [Collected works in 3 volumes]. 1965. T. 1. 720 p.; T. 2. 459 p.; T. 3. 512 p.

10. Holovach I.V. Minimalno dopustyma chastota kolyvan vibratsiinoho vykopuiuchoho robochoho orhanu – [The minimum permissible frequency of oscillations of the vibrating excavating working body]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh*. Vinnytsia, 2012. № 4(68). P. 35–41. [in Ukrainian]

11. Huk Ya.V. Vykorystannia pobichnoi produktsii kukurudzy v enerhetychnykh tsiliakh – [Use of corn by-products for energy purposes]. *Perspektyvy rozvytku terytorii: teoriia i praktyka*. Kharkiv : KhNUMH, 2021. P. 363–367. [in Ukrainian]

12. Hutsol T., Glowacki S., Mudryk K. Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics) : monograph. Warsaw, 2021.

13. Iermakov S.V. Doslidzhennia problemy zvilnennia polia vid reshtok kukurudzy. Lidery APK XXI stolittia – [Study of the problem of freeing the field from corn residues]. *Informatsiini materialy VI zlotu imennykh stypendiativ i vidminnykiv navchannia*. Kharkiv, KhNAU im. Dokuchaieva, 2010. P. 355–359. [in Ukrainian]

14. Korchak M.M., Yermakov S.V. Doslidzhennia kharakteru zasmichenosti polia lystostebelnyh ta korenevymy zalyshkamy pislia zbyrannia kukurudzy – [Investigation of the nature of the field weed by leafy and root residues after harvesting corn]. *Zbirnyk naukovykh prats Podilskoho derzhavnogo aharno-tekhnichnoho universytetu*. 2007. Vol. 15. P. 498–504. [in Ukrainian]

15. Kucher O.V., Yermakov S.V. Metodolohiia marketynhovykh doslidzen bioekonomichnykh protsesiv. *Podilskiy visnyk. Seriia "Silske hospodarstvo, tekhnika"*. 2023. № 38. P. 132–139. doi: 10.37406/2706-9052-2023-1.19

16. Li J., Jiang X., Ma Y., Tong J., Hu B. Bionic Design of a Potato Digging Shovel with Drag Reduction Based on the Discrete Element Method (DEM) in Clay Soil. *Appl. Sci*. 2020. Vol. 10. P. 7096. doi: 10.3390/app10207096

17. Loveikin V.S., Chovniuk Yu.V., Diachenko L.A. Dynamichnyi analiz tiahovoho oporu vibropluhiv – [Dynamic analysis of traction resistance of vibrating plows]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh*. 2012. № 3(67). P. 112–115. [in Ukrainian]

18. Ma X., Wang S., Wang H. Vibration Soil Crushing Mechanism of Self-excited Vibration Subsoiler in Coastal Area. *J. Coast. Res*. 2020. 103. P. 426–430. doi: 10.2112/SI103-087.1

19. Mudryk K., Bendera I., Jewiarz M. Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine: Polish-Ukrainian cooperation : scientific monograph / State Agrarian and Engineering University in Podilya, Agriculture University in Kraków. Vol. I. Kraków : Traicon, 2017.

20. Niyamapa T., Salokhe, V.M. Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool. *Journal of terramechanics*. 2000. Vol. 37–3. P. 151–166.
21. Patent 1197117 Ukraina, MPK (2018.01) KS1K 13/00 16/00. Korpus pluha z pnevmatychnym rozpshuvachem gruntu – [Body of a plow with a pneumatic soil loosener]. Bozhok A.M., Tiukhtii O.S.. Zaiavl. 05.11.15; Opubl. 25.05.2016. Biul. № 10. P. 5. [in Ukrainian]
22. Posna S., Vilchynska D., Yermakov S., Oleksiiko S. Suchasni typy dyskovykh znariad z vysokoiu podribnuiuchoiu zdattisti dlia obrobtku hruntu pislia hrobotoblovykh kultur – [Modern types of disc tools with high crushing capacity for soil cultivation after coarse-stemmed crops]. *Multidisciplinary academic notes. Science research and practice*. Madrid, Spain, 2022. P. 36–40. [in Ukrainian]
23. Shahgoli G., Saunders C., Desbiolles J. An investigation into the performance of vibratory tillage using straight and bent leg tines. *Soil management for sustainability*. 2006. Vol. 38. P. 21.
24. Sun J., Wang Y., Ma Y., Tong J., Zhang Z. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Adv. Eng. Softw.* 2018. Vol. 119. P. 30–37. doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.02.001
25. Szabo B., Barnes F., Sture S. Effectiveness of vibrating bulldozer and plow blades on draft force reduction. *Transactions of the ASAE*. 1998. Vol. 41–2. P. 283–290.
26. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V. Effect of Vibration on Resistance Force of Plough. *Advances in Engineering Research*. 2018. Vol. 151. P. 779–783.
27. Voitiuk D.H. Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku – [Agricultural machinery. Basics of theory and calculation] / D.H. Voitiuk, V.M. Baranovskyi, V.M. Bulhakov ta in. Kyiv : Vyshcha osvita, 2005. 464 p. [in Ukrainian]
28. Voitiuk D.H. Silskohospodarski mashyny: osnovy teorii ta rozrakhunku – [Agricultural machines: basics of theory and calculation] / D.H. Voitiuk, S.S. Yatsun, M.Ia. Dovzhyk. Sumy : VTD Universytetska knyha, 2008. 543 p. [in Ukrainian]
29. Yang M., Sun X., Deng X., Lu Z., Wang T. Extrapolation of Tractor Traction Resistance Load Spectrum and Compilation of Loading Spectrum Based on Optimal Threshold Selection Using a Genetic Algorithm. *Agriculture*. 2023. Vol. 2. Iss. 13(6). P. 1133. doi: 10.3390/agriculture13061133
30. Yermakov S.V. Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. *Podilskyi visnyk. Seriya "Sil'ske gospodarstvo, tekhnika, ekonomika"*. 2017. Vol. 2. P. 37–45.
31. Yermakov S.V., Hutsol T.D. Strukturuvannia protsesu avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnoi verby [Structuring the process of automation of planting plants of energy willow]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2021. Vol. 3(45). [in Ukrainian]
32. Yermakov S.V., Hutsol T.D., Mykhailova L.M. Rozrakhunkovi formuly vyznachennia shvydkosti vyvantazhennia zhyvtsiv enerhetychnoi verby z tochky zoru hidrodinamichnykh bahatofaznykh system – [Calculation formulas for determining the rate of discharge of energy willow cuttings from the point of view of hydrodynamic multiphase systems]. *Podilian Bulletin. Seriya "Agriculture, Engineering, Economics"*. 2021. Vol. 34. [in Ukrainian]
33. Zaika P.M. Teoriia silskohospodarskykh mashyn. T. 1 (4.1). Mashyny ta znariaddia dlia obrobtku gruntu. – [Theory of agricultural machines. T. 1 (4.1). Machines and tools for soil cultivation]. Kharkiv : Oho, 2011. 444 p. [in Ukrainian]

Yermakov S.V., Head of the Educational and Scientific Laboratory «DAK GPS», Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Duhanets V.I., Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Oleksiiko S.L., Assistant, Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Vilchynska D.V., Candidate of Agricultural Sciences, Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Pukas V.L., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Podillia State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

Development and rationality substantiation of using pneumatic vibrating action looseners on plow bodies

The article analyzes modern trends in solving the problem of energy resource saving when performing soil cultivation operations. The paper sets an empirical task to develop a mechanism for ensuring vibrations on plow bodies and to reveal the general theoretical dependence of the oscillatory action of vibratory looseners on the traction resistance of the unit. It is proposed to improve the plow by installing an additional pneumatic soil loosener in the ploughshare. Due to this, the unevenness and maximum deviations of the soil resistance will decrease, which will increase the reliability and durability of the housings and the plow as a whole. The rational formula of V.P. Goryachkin was adapted to derive the dependence of traction resistance on the action of vibrations. In order to take into account the effect of vibrations in it, an analysis of research by domestic and foreign scientists was carried out on the subject of the influence of vibrations on the friction coefficient f_0 and specific traction resistance K . The averaged data was taken during the construction of the theoretical dependences for the plow with the use of pneumatic looseners of vibration action in this paper. The given graph of the dependence of the traction resistance on the speed of movement at different depths of cultivation for traditional units and units with the use of vibratory looseners in general in general appearance and values corresponds to similar graphs of traction resistance given by other scientists. It was found that the use of vibrations reduces the theoretically calculated traction resistance of the plow in the speed range of 0.5–2.5 m/s by 19–23%. Moreover, at lower speeds, the influence of vibrations is more important: a reduction in traction resistance by 22–23% at a speed of 0.5m/s and by 19–20% at 2.5m/s, which is fully correlated with the data of a number of other studies. The results obtained in the work can further serve to clarify and improve existing engineering methods for calculating the main characteristics and parameters of vibratory plows, both at the stages of their design / construction and in real operation modes.

Key words: plow, pneumatic hammer, pneumatic soil loosener, vibrations, traction resistance, coefficient of friction, vibro plow.