

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

**Павельчук Юрій Федорович**

кандидат технічних наук, доцент  
Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
ORCID: 0000-0001-5028-8151  
yuriy3372@gmail.com

**Ляшук Олег Леонтійович**

доктор технічних наук, професор  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна  
ORCID: 0000-0003-4881-8568  
oleglashuk@ukr.net

**Грушецький Сергій Миколайович**

кандидат технічних наук, доцент  
Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
ORCID: 0000-0002-6434-1213  
g.sergiy.1969@gmail.com

**Прокопова Ольга Петрівна**

кандидат педагогічних наук, доцент  
Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
ORCID: 0000-0002-2108-0009  
olhaprokopova75@gmail.com

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

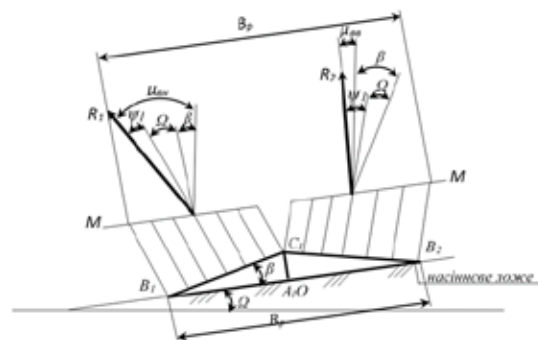
$$\nabla^2 V_i = \frac{d^2 V_i}{dx^2} + \frac{d^2 V_i}{dy^2} + \frac{d^2 V_i}{dz^2} \text{ – лапласіан.}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

де  $\Omega$  – кут нахилу мікрорельєфу, град,

$\psi_1$  – поперечне відхилення за рахунок бокової сили, град.

Кут відхилення  $\psi_1$  під час руху агрегата вздовж горизонталей визнається:

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

де технологічний кут встановлення робочої поверхні до горизонтальної площини  $\varepsilon_1$  знаходимо з виразу

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

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

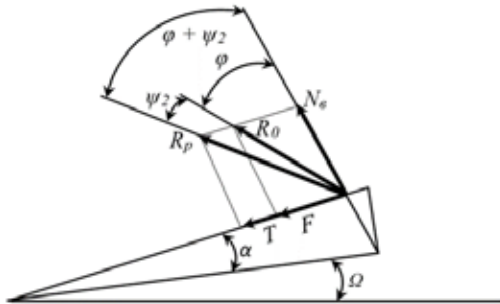


Рис. 2. Схема сил які діють на шар ґрунту під час руху вздовж схила

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

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

анлогічно визначаємо величини  $\varepsilon_2$  та  $\gamma_1$ :

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

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

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

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

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

де  $a$  – глибина ходу робочого органа, м.

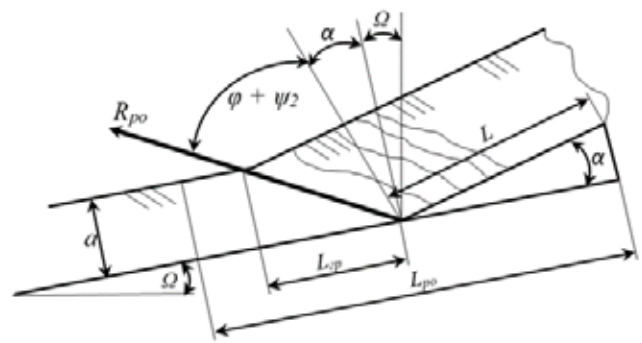


Рис. 3. Схема для визначення параметрів робочої площини

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

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

де  $S$  – геометричний розмір робочого органа, м;

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

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

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

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

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

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

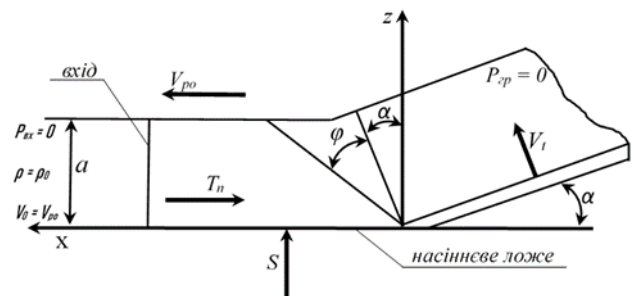


Рис. 4. Початкові і граничні умови взаємодії робочого органа з ґрунтовим середовищем

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

Вертикальна складова визначатиметься

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

Після перетворення одержуємо вираз

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

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

Водночас проходить зміна напрямку векторів швидкостей за рахунок зміни напрямку абсолютної швидкості руху шару ґрунту на кут  $\psi_2$  відносно напрямку руху робочого органа (рис. 5).

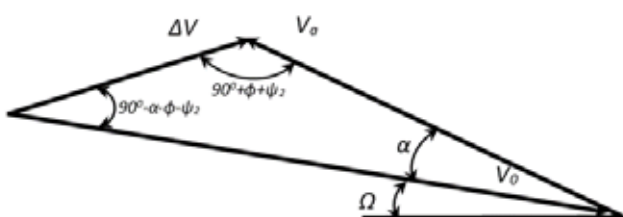


Рис. 5. Схема зміни швидкостей шару ґрунту на схилах

Тоді товщина шару ґрунту перед робочим органом буде визначатись

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

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

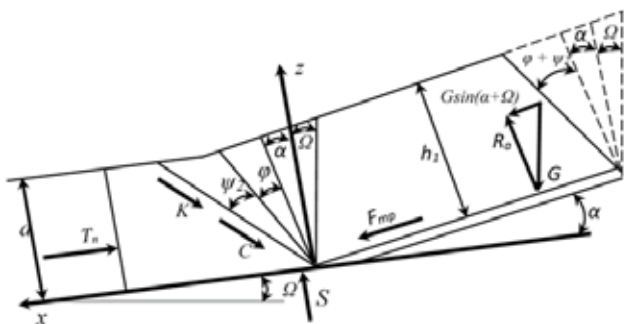


Рис. 6. Схема сил які діють на шар ґрунту на схилах

Зі схеми видно, що

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

а сила підпирання

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

одержуємо кінцевий результат

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

На величину підпирання впливають кути  $\gamma$  та  $\varepsilon$  робочого органа (рис. 7, 8).

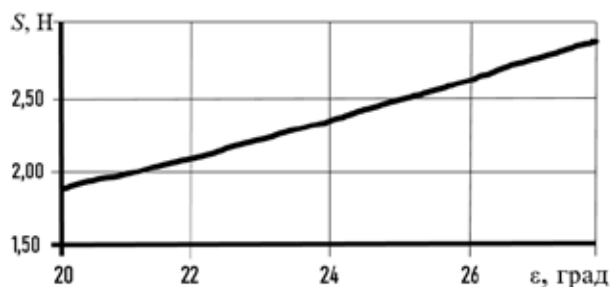


Рис. 7. Залежність сили підпирання  $S$  від кута  $\varepsilon$ , коли  $\gamma = 30^\circ$

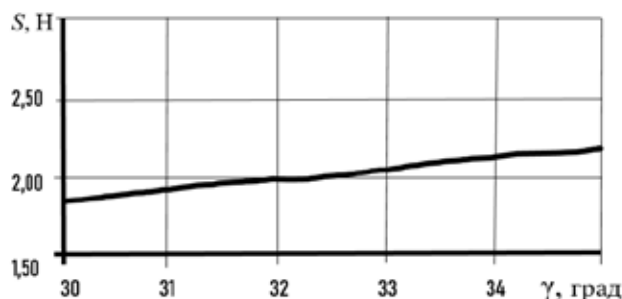


Рис. 8. Залежність сили підпирання  $S$  від кута  $\gamma$ , коли  $\varepsilon = 30^\circ$

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

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

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

### Бібліографічні посилання:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Дата надходження до редакції: 07.12.2021 р.