



УДК 631.331.86. 2/3

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-4

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

Грушецький Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
Павельчук Юрій Федорович, к.т.н., доцент
Подільський державний аграрно-технічний університет
Бабин Ігор Анатолійович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет
Ляшук Олег Леонтійович, д.т.н., професор
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Sergiy Hrushetskiy, Ph.D., Associate Professor
Yuriy Pavelchuk, Ph.D., Associate Professor
Podolsk State Agrarian Technical University
Ihor Babyn, Ph.D., Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University
Oleg Lyashuk, Doctor of Technical Sciences, Professor
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy

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.

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 органу 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 органу з ґрунтовим середовищем, схему сил що діють на ґрунтовий шар, схему для визначення швидкості руху шару ґрунту, схему зміни швидкостей шару ґрунту на схилах, схему сил які діють на шар ґрунту на схилах, залежність сили тяжіння шару ґрунту на поверхні робочого органу та сили підпирання від кута нахилу схила, залежність сили підпирання від кута. Розглянуто початкові і граничні умови математичної моделі технологічного процесу, та розроблено методіку реалізації математичної моделі технологічного процесу роботи робочого органу 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, сімба, зернові, сошник, фізико-механічні властивості ґрунту.

Ф. 19. Рuc. 11. Літ. 29.

1. Постановка проблеми

Сьогодні значний сектор технічного забезпечення сільського господарства в Україні займають високопродуктивні широкозахватні машини. Саме посівні машини такого типу дозволяють значною мірою вирішити проблеми своєчасного якісного посіву з поєднанням інших технологічних операцій – підготовки ґрунту, внесення добрив, загортання, прикочування тощо. При цьому вивільниться значна кількість технічних і людських ресурсів, терміни посіву будуть точно дотримуватися.



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.

Поява вчасних і дружних сходів, нормальний розвиток і перезимівля рослин, формування високого врожаю значною мірою залежать від глибини загортання насіння – одного з основних показників якості сівби озимої пшениці, вона значною мірою визначає будову майбутнього проростка і тип рослини. Розміщення насіння на однаковій глибині забезпечить дружний і рівновеликий розвиток рослин, дозволить зменшити міжвидову конкуренцію і дозволить значно підвищити врожай. Слід приділити увагу ще такому важливому моменту як контакт насіння з ґрунтом, бо чим щільніше насіння прилягає до ґрунту, тим швидше воно вбирає в себе вологу, набухає, проростає. На формування дружних сходів культур і їхнього росту та розвитку у подальшому впливає ґрунтова волога, тому така важлива увага приділяється сівалкам, а саме їх робочим органам – сошникам.

Існує безліч тонкощів і факторів, які ми повинні не упустити при посіві, тому для підвищення якісних показників посіву ми повинні ретельно підібрати тип і параметри робочих органів (сошників) для конкретної ґрунтово-кліматичної зони. Саме від конструкції сошника залежить рівномірний розподіл насіння за площею живлення, а також рівномірне їх закладання на однакову глибину.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виробники сільськогосподарських машин пропонують сьогодні цілий ряд сошників різних видів: однодисковий; дводисковий; долотовидний; анкерний та ін.

На сьогоднішній день близько 85% всіх посівних агрегатів виробники сільськогосподарських машин поставляють з одно- або дводисковими сошниками, бо анкерні сошники виходять з моди, а долотовидні використовуються тільки за певних умов.

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

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

Зокрема Б.М. Гевко у свої працях вирішив наступні завдання: підвищення надійності та продуктивності однозернових висівних апаратів (Невко et al., 2013; Невко et al., 2014; Невко, 2012); розробка моделі руху частинки висівного матеріалу (Pavel'chuk 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.

В сучасних посівних комплексах процес дозування та сівби контролюється різноманітними електронними системами, які дозволяють з високою точністю виконати подачу насіння до посівного ложа (Shustik et al., 2012; Danyliuk et al., 2011). Тоді як рівномірність розподілення насіння в рядку та глибину сівби на теперішній час можливо визначити тільки по факту – розкриттям рядків.

На сьогоднішній день для вивчення технологічного процесу взаємодії робочих органів з ґрунтом береться до уваги концепція та системо-аналогова модель функціонування комбінованого ґрунтообробно-посівного агрегату (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).



3. Мета та завдання дослідження

Метою власного дослідження є проведення теоретичного аналізу взаємодії ґрунтового шару із поверхнею робочого органу сівалки під виконання технологічного процесу висіву насіння зернових культур на схилах.

4. Матеріали і методи

Під час моделювання технологічного процесу обробітку 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 обробітку 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.

5. Виклад основного матеріалу

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

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

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

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

Проінтегрувавши цю систему рівнянь одержимо скалярне поле тиску, векторне поле швидкостей у кожен момент часу, тяговий опір робочого органу та траєкторії руху частинок ґрунту.

Подання даної 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 дія сили тяжіння, відносно поверхні робочого органу.

Під час роботи посівних агрегатів на схилах на характер переміщення ґрунту робочим органом здійснює вплив зміна напрямку дії сили тяжіння відносно робочої поверхні сошника. Тому під час моделювання процесу взаємодії робочого органу з шаром ґрунту на схилах необхідно брати до уваги, що сошник нахилиється відносно вертикальної осі на кут нахилу рельєфу Ω , що спонукає до зміни технологічних параметрів робочого органу відносно горизонтальної площини. Паралельно виникає сила, що діє на шар ґрунту вздовж схилу донизу, що в свою чергу змушує змінитись траєкторії руху шару ґрунту по поверхні робочого органу.

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

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

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

$$\mu_{BH} = \beta + \Omega + \Psi_1, \quad (2)$$

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

$$\mu_{BH} = \beta - \Omega - \Psi_1, \quad (3)$$

де Ω – кут нахилу мікрорельєфу, град, Ψ_1 – поперечне відхилення за рахунок бокової сили, град.

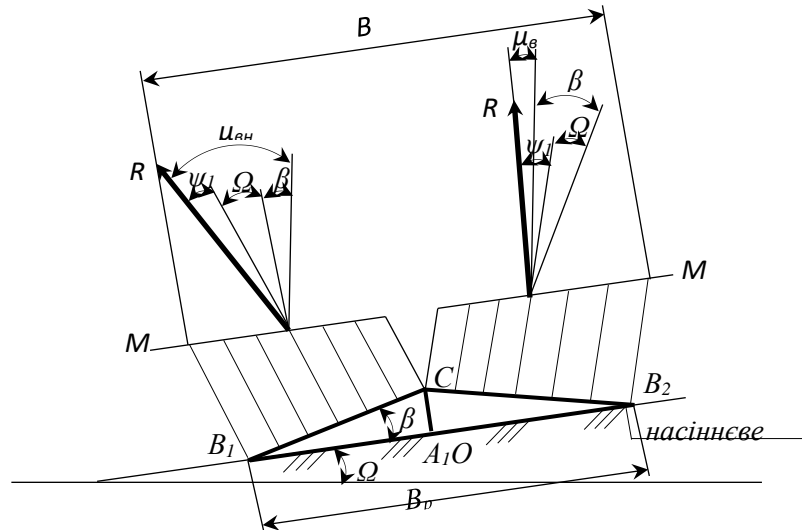


Рис. 1. Схема сил що діють на ґрунт під час робочого процесу

Кут відхилення ψ_1 під час руху агрегата вздовж горизонталей визнається:

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

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

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

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

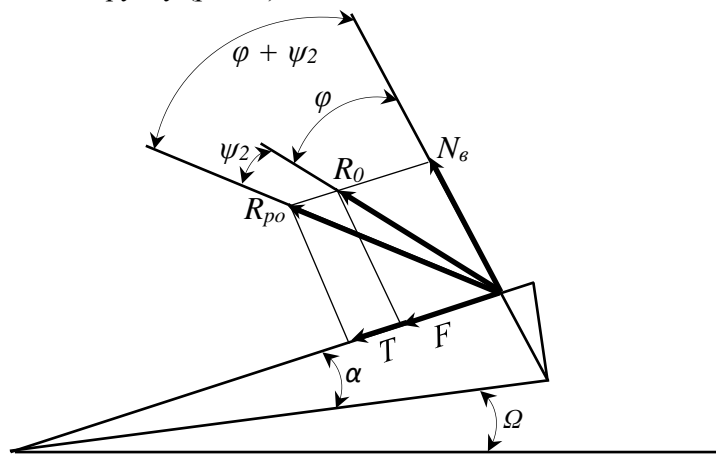


Рис. 2. Схема сил які діють на шар ґрунту під час руху вздовж схилу

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

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

аналогічно визначаємо величини ε_2 та γ_1 :

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

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

Аналогічно, під час руху робочого органу догори по схилу, рівнодіюча сила R_{po} відхиляється від нормалі на кут $\varphi - \psi_2$.

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



Мінімальна відстань $L_{гр}$ від робочого органу до стінок робочої площини (паралелепіпеда) у поздовжній площині буде визначатись

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

де a – глибина ходу робочого органу, м.

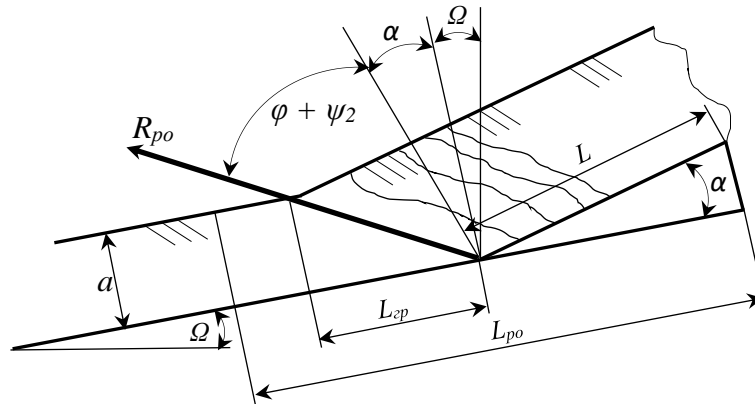


Рис. 3. Схема для визначення параметрів робочої площини

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

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

де S – геометричний розмір робочого органу, м; $k_L = 1,5 \dots 2$ – коефіцієнт запасу.

Ширина робочої площини $B_{рo}$ має бути відповідною ширині захвату робочого органу v_p , а тому

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

У випадку роботи робочого органу на пісчанних ґрунтах ширина робочої площини збільшується за рахунок внутрішнього тертя середовища. Виходячи з вище сказаного, в такому випадку ширина робочої площини визначається за рівнянням

$$B_{рo} = v_p + a \operatorname{tg}(\alpha + \varphi + \psi_1) + a \operatorname{tg}(\alpha + \varphi - \psi_1). \quad (9)$$

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

Таким чином, під час моделювання робочого процесу обробітку ґрунту на схилах необхідно враховувати зміни величин і напрямку дії сил на кожній з робочих площин поверхонь робочого органу сівалки.

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 органу V_o і на вході у розрахункову площину робочого органу, та фізико-механічні властивості ґрунту (рис. 4) (Naumenko et al., 2017; Derkach et al., 2017).

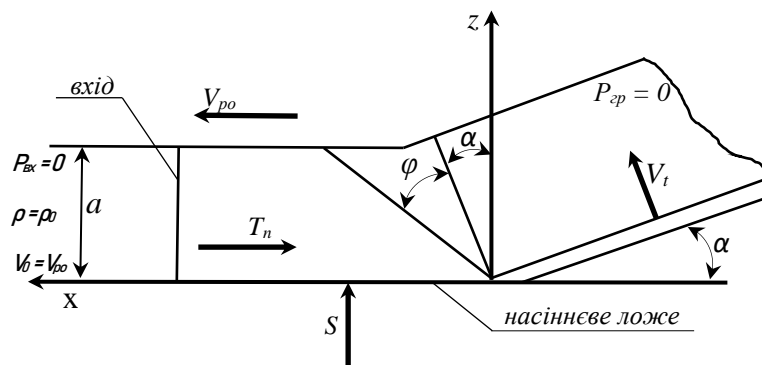


Рис. 4. Початкові і граничні умови взаємодії робочого органу з ґрунтовым середовищем

Встановлено за умови подібності [2] швидкість середовища має бути рівною швидкості $V_{рo}$ руху робочого органу:

$$V_c = V_{рo} \quad (10)$$



Беручи до уваги, що границя розрахункової площини виходить за межі зони деформації ґрунту робочим органом, звихрєнь на межах розрахункової площини не спостерігається. Відповідно на межі “вхїд” та “вихїд” тиск з боку робочого оргну відсутній, вплив має тільки маса ґрунтового шару. Тому, на межі “вхїд” та “вихїд” витримується умова:

$$P_{вх} = 0, P_{вих} = 0. \quad (11)$$

За показники фізичних параметрів ґрунтового середовища приймаємо щільність ρ і в’язкість μ робочого середовища.

Геометричні параметри робочого органу використовують під час побудови у системі автоматизованого проектування технологічного процесу виконання операції.

Граничні умови під час руху робочого органу у ґрунтовому середовищі знаходяться в межах контакту з поверхнею площини сошника (рис. 4).

Граничні умови записуємо виходячи з умов непроникності тіла. Ця умова зводиться до того, що в будь-якій точці, яка належить границі тіла, перпендикулярна до поверхні складова швидкості V_i повинна дорівнювати нулю:

$$V_i = 0. \quad (12)$$

Граничні умови між ґрунтовим середовищем та повітрям характеризуються рівністю нулю тиску на межі їх розділення:

$$P_{zp} = 0. \quad (13)$$

Під час визначення граничних умов дна насінневого ложе необхідно враховувати тиск зі сторони нижніх шарів ґрунту. Даний 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.

Розглянемо процес взаємодії робочого органу, який має форму плоского двогранного клина, з ґрунтовим середовищем під час роботи у горизонтальній площині (рис. 5).

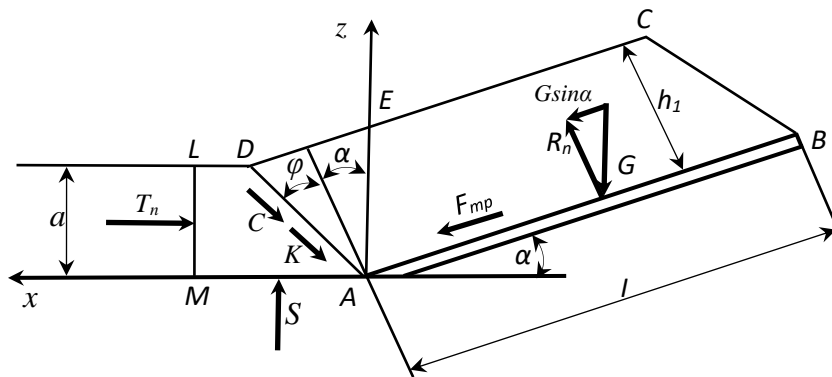


Рис. 5. Схема сил що діють на ґрунтовий шар

Шар ґрунту $ABCDLM$ умовно поділимо на дві зони. До першої зони $ABCD$ віднесемо шар ґрунту, що знаходиться на робочій поверхні робочого органу до площини руйнування. До другої зони віднесемо шар який знаходиться попереду площини руйнування $ADLM$ товщиною, що дорівнює глибині ходу робочого органу a . Під час обробітку ґрунту на шар середовища у першій зоні діють наступні сили: сила тяжіння G , нормальна сила тиску робочого органу на дно борозни R_n , сили внутрішнього тертя ґрунту F_{sm} , сила тертя ковзання F_m , сила зчеплення C , сила підпирання підорного шару ґрунту, а також сила від прискорення ґрунтового шару K . На другу зону шару ґрунту діє сила зі сторони першої зони і сили підпирання зі сторони нерозпушеного ґрунтового шару T_n і S .

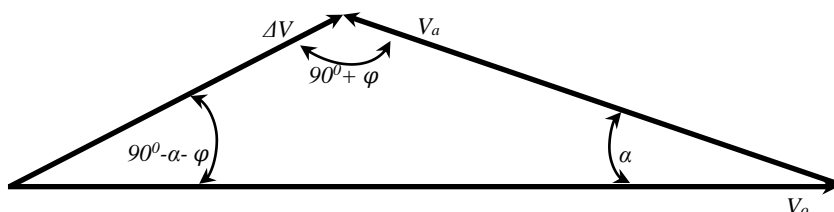


Рис. 6. Схема для визначення швидкості руху шару ґрунту



З метою визначення товщини шару ґрунту h_1 що потрапляє на робочу поверхню робочого органу зобразимо векторну діаграму швидкості шару ґрунту, тобто визначемо співвідношення швидкостей руху робочого органу та відносної швидкості шару ґрунту по робочій поверхні сошника.

$$\text{За теоремою синусів } \frac{V_a}{\sin(90^\circ - \alpha - \varphi)} = \frac{V_0}{\sin(90^\circ + \varphi)}.$$

Звідси видно, що відносна швидкість шару ґрунту по робочій поверхні знижується на величину: $\frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi}$. Тому товщина ґрунтового шару буде збільшуватись за рівністю:

$$h_1 = a \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha + \varphi)}. \quad (14)$$

Дане рівняння показує, що за умов збільшення кута подрібнення α збільшується деформація ґрунтового шару у поперечному напрямі та покращується подрібнення ґрунту.

За умови, коли шар ґрунту сходиться з робочої поверхні робочого органу, у точці C , дія робочого органу на шар припиняється – лінія BC , а далі ґрунтовий шар рухається за інерцією по траєкторії вільного падіння. Тому на робочий орган діє сила тяжіння шару ґрунту $ABCE$ яка визначається зза формулою:

$$G = \left(L h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin \varphi + \sin \alpha) \right) B_p \rho g, \quad (15)$$

де L – довжина робочої поверхні сошника, м; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ – об'ємна маса ґрунту, кг/м³; B_p – ширина захвату робочого органу, м.

Сила тяжіння ґрунтового шару діятиме у двох напрямках: перпендикулярно до поверхні робочого органу $G \cos \alpha$ та вздовж поверхні робочого органу у напрямі вниз до леза робочого органу $G \sin \alpha$.

В наслідок дії цієї сили виникає реакція робочого органу $R_n = G \cos \alpha$ та сила тертя ґрунту по робочій поверхні камери розсіву сошника сівалки $F_m = G \cos \alpha \cdot \tan \varphi$.

Маса ґрунтового шару G , сила інерції пласта K , когезійна сила C діє на робочий орган і ніяким чином не впливає на ґрунтовий шар, що знаходиться перед робочим органом. Силами, котрі впливають на величину підпору, є сила тертя $F_m = G \cos \alpha \cdot \tan \varphi$ та складова сили тяжіння шару, що діє вздовж напрямку руху робочого органу $G \sin \alpha$, звідси сила підпирання буде дорівнювати їх сумі, тобто $W_n = G \cos \alpha \cdot \tan \varphi + G \sin \alpha$.

Сила підпирання W_n буде діяти за двома напрямками: в горизонтальному напрямку руху робочого органу T_n та вертикальному S , що направлений вгору. Вертикальна складова визначатиметься:

$$S = W_n \sin \alpha = (G \cos \alpha \tan \varphi + G \sin \alpha) \sin \alpha.$$

Після перетворення одержуємо вираз:

$$S = \left(L h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin \varphi + \sin \alpha) \right) (\tan \varphi + \tan \alpha) \frac{\sin 2\alpha}{2} B_p \rho g. \quad (16)$$

Присутність даної сили приводить до зминання ґрунту перед тим як в роботу вступить лезо лапи та почнеться процес різання. Зрізування шару ґрунту, що знаходиться під напругою, веде до ущільнення ґрунту на глибині обробітку та сприяє утворенню плужної підшви як під час оранки ґрунту так і під час утворення насінневого ложе робочими органами у вигляді екстирпаторних лап.

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

Одночасно проходить зміна напрямку векторів швидкостей за рахунок зміни напрямку абсолютної швидкості руху шару ґрунту на кут ψ_2 відносно напрямку руху робочого органу (рис. 7).

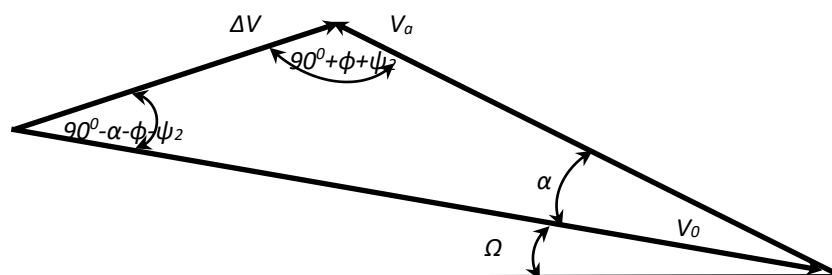


Рис. 7. Схема зміни швидкостей шару ґрунту на схилах



Тоді товщина шару ґрунту перед робочим органом буде визначатись

$$h_1 = a \frac{\cos(\varphi + \psi_2)}{\cos(\alpha + \varphi + \psi_2)} \quad (17)$$

Для знаходження сили тяжіння шару ґрунту, що діє на робочий орган, зобразимо схему роботи робочого органу на схилі (рис. 8).

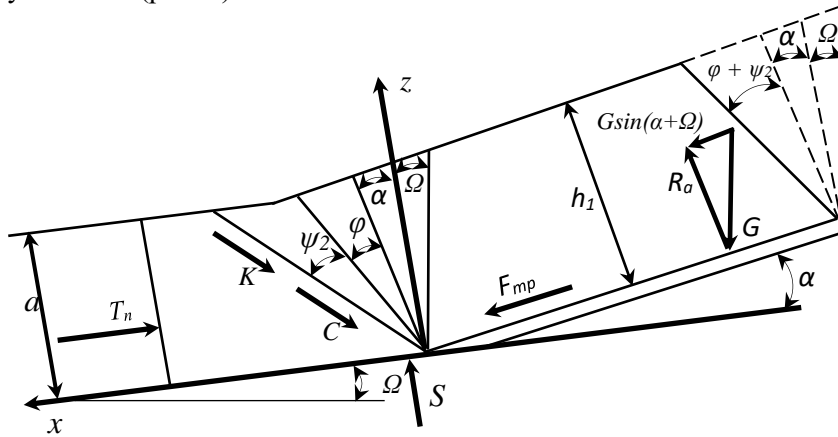


Рис. 8. Схема сил які діють на шар ґрунту на схилах

З даної схеми видно, що:

$$G = \left(I h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin(\varphi + \psi_2) + \sin(\Omega + \alpha)) \right) B_p \rho g, \quad (18)$$

а сила підпирання:

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

одержуємо кінцевий результат:

$$S = \left(I h_1 - \frac{h_1^2}{2} (\sin(\varphi + \psi_2) + \sin(\Omega + \alpha)) \right) \cdot [\cos(\alpha + \Omega) \operatorname{tg} \varphi + \sin(\alpha + \Omega)] \sin \alpha B_p \rho g, \quad (19)$$

Під час переміщення робочого органу вгору по схилі сила підпирання S розраховується аналогічно, але з від'ємними значеннями кута нахилу схила.

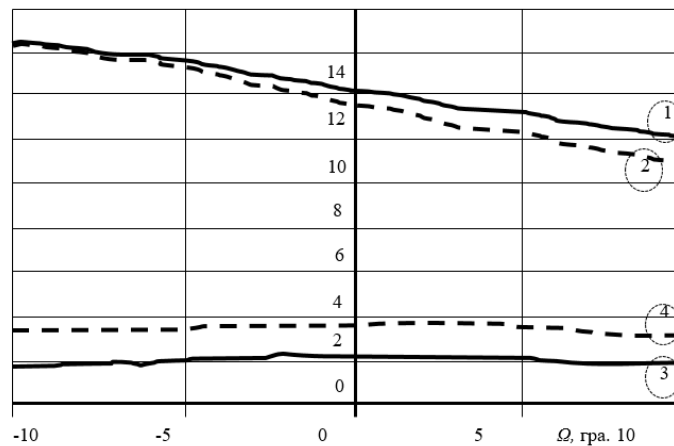


Рис. 9. Залежність сили тяжіння шару ґрунту на поверхні робочого органу G та сили підпирання S від кута нахилу схила Ω :

- 1 – сила тяжіння шару ґрунту на робочому органі, коли $\gamma = 30^\circ$ та $\varepsilon = 20^\circ$;
- 2 – сила тяжіння шару ґрунту на робочому органі, коли $\gamma = 35^\circ$ та $\varepsilon = 28^\circ$;
- 3 – сила підпору дна ґрунтового ложе, коли $\gamma = 30^\circ$ та $\varepsilon = 20^\circ$;
- 4 – сила підпору дна ґрунтового ложе, коли $\gamma = 35^\circ$ та $\varepsilon = 28^\circ$.

Однак, на величину підпирання впливають кути γ та ε робочого органу (рис. 10, 11).

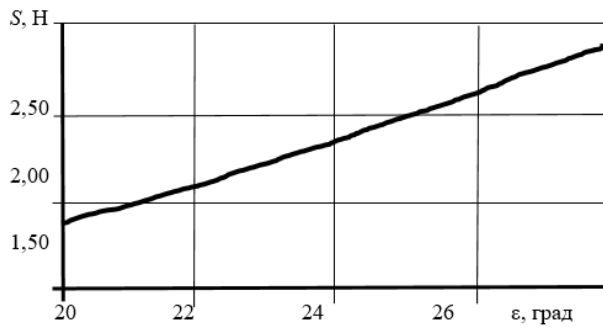


Рис. 10. Залежність сили підпирання S від кута ϵ , коли $\gamma = 30^\circ$

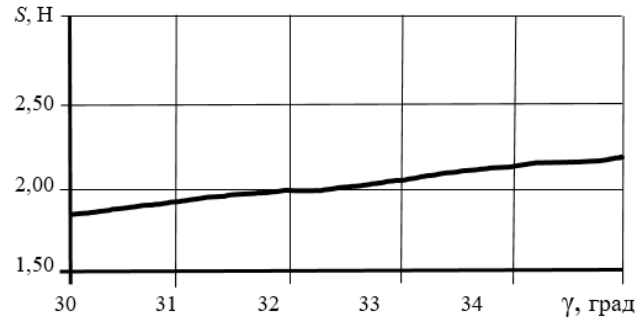


Рис. 11. Залежність сили підпирання S від кута γ , коли $\epsilon = 30^\circ$

6. Висновки та перспективи подальших досліджень

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

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

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 дану математичну модель під час виконання технологічних робіт на схилах з різним рельєфом.

Список використаних джерел

1. Гевко Б. М., Павельчук Ю. Ф., Лотоцький Р. І., Навроцька Т. Д. Технологічність конструкцій однозернових висівних апаратів сівалок. *Сільськогосподарські машини*. 2013. Вип. 24. С. 61–67.
2. Гевко Б. М., Ляшук О. Л., Павельчук Ю.Ф., Пришляк В.М. Технологічні основи проектування та виготовлення посівних машин: монографія. Тернопіль: Вид. ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 238 с.
3. Гевко Б. М. Математична модель руху зерна по рухомих поверхнях висівних апаратів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. № 11. С.113–118.
4. Павельчук Ю. Ф., Гевко Б. М. Математическая модель динамики системы «семяпровод-зерно». *Теория и практика современной науки*. 2016. № 12. С. 330–334.
5. Lashyk O, Gevko B., Pavelchuk Y. Grounding of subsoil-throwing sowing of grain-crops. *Scientific journal «Fundamentalis scientiam»*. 2017. № 2 (3). P. 106–111.
6. Амосов В.В. Обґрунтування параметрів універсального висівного апарата для просапних культур: дис... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2007. 131 с.
7. Косінов М. М., Амосов В. В., Мартиненко С. А., Кириченко А. М., Віннік О. Л. Удосконалення конструкції пневматичного висівного апарата з метою покращення якості сівби. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42 (1). С. 194–198.
8. Аулин В. В., Панков А. А., Замота Т. Н. Надёжность рабочих процессов технических средств АПК с элементами пневмоники. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. № 5. 2016. С.117–125.
9. Бойко А. І., Амосов В. В. Експериментальне визначення раціональних параметрів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин : загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2006. Вип. 36. С.108–110.



10. Сисолін П. В., Свірень М. О., Лісовий І. О. Пряма сівба. Задачі і напрямки розвитку сошників для прямої сівби. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин : загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2007. Вип. 37. С. 94–98.
11. Свірень М. О., Анісімов О. В., Солових Є. К. Дослідження параметрів та режимів роботи пневмомеханічного висівного апарату надлишкового тиску з рециркулюючим потоком насіння. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр.* 2015. Вип. 28. С. 223–229.
12. Лісовий І. О., Бойко А. І., Свірень М. О., Пушка О. С. Пряма сівба та обґрунтування параметрів сошника. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 176–189.
13. Сало В. М., Лузан О. Р. Вибір напрямів вдосконалення сошників сівалок прямого посіву зернових культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 40, Част. II. С. 271–277.
14. Лузан О. Р., Сало В. М., Лузан П. Г., Лещенко С. М. Обґрунтування параметрів посівної секції для прямої сівби зернових культур. *Зб. наук. праць ВНАУ. Серія: Технічні науки*. 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 217–222.
15. Павельчук Ю. Ф. Обґрунтування параметрів сошників для сівби зернових культур підґрунтового-розкидним способом: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кам'янець-Подільський, 2009. 245 с.
16. Гевко Б. М., Павельчук Ю. Ф. Дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтового-розкидному способі сівби : теоретичний аналіз. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Ч. 2. Технічні науки*. 2016. Вип. 24. С. 25–32.
17. Рудь А. В., Павельчук Ю. Ф., Мошенко І. О. Вплив способу подачі насіння в камеру розсіву на рівномірність його розподілу по площі живлення. *Техніка та енергетика АПК*. 2010. Вип. 144. С. 288–295.
18. Шустік Л., Гайдай Т. Пошук альтернативних енергоощадних технологій і дослідження для посіву дрібнонасіньових культур. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2012. Вип. 16 (30). Книга 2. С. 116–119.
19. Міні-сівалка BioDrill на культиваторах Vaderstad найбільш економічний спосіб посіву сидеральних культур і озимого ріпаку. *Земледелец*. №4. 2012. С. 18–23.
20. Пришляк В. М., Яропуд В. М., Поборознюк О. А. Особливості полицевого та безполицевого обробітку ґрунту. *Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК»*. 28-30 листопада 2017 року. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 133–135.
21. Ролдугін М. І., Пономаренко Н. О., Яропуд В. М., Сидоренко Р. М. Стан і перспективи розвитку комбінованих агрегатів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 2 (98). С. 40–43.
22. Науменко М. М., Деркач О. Д. Побудова математичної моделі процесу взаємодії дисково-анкерного сошника з ґрунтом при динамічних навантаженнях. *Вісник ХНТУСГ імені П. Василенка. Технічний сервіс машин для рослинництва: зб. наук. праць*. 2017. Вип. 181. С. 267–274.
23. Деркач О. Д., Макаренко Д. О. Теоретичні передумови до обґрунтування режимів роботи паралелограмного копіювального механізму. *Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке: XIII Междун. форум молодежи*. Харків: ХНТУСГ, 2017. 61 с.
24. Деркач О. Д., Науменко М. М. Теоретичне обґрунтування режимів роботи паралелограмного копіювального механізму. *Підвищення надійності машин та обладнання: XI Всеукр. наук.-практ. конф.* Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 13–16.
25. Деркач О. Д., Макаренко Д. О. Розробка системи підвищеної коректності копіювання поверхні ґрунту. *Сучасні проблеми землеробської механіки: XVIII Міжнар. наук. конф.* Кам'янець-Подільський: ПДАТУ, 2017. С. 79–82.
26. Рудь А. В., Бендера І. М., Войтюк Д. Г. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. У 2 т. Т. 1; за ред. А.В. Рудя. Київ: Агроосвіта, 2012. 584 с.
27. Ріпка І. І., Семен Я. В., Крупич О. М., Бендера І. М., Рудь А. В. Основи механізації сільськогосподарського виробництва : навч. посіб. Львів: ЛНАУ, 2013. 224 с.
28. Грушецький С. М., Слотвінська Н. Я. Концепція та системо-аналогова модель функціонування комбінованого ґрунтообробно-посівного агрегата. *Матеріали VII всеукр. наук.-практ. конф., «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* : зб. наук. праць; за заг. ред. С.С. Добрянський. Житомир : АТК, 2021. С. 39–41.



29. Грушецький С. М. Слотвінська Н. Я. Аналіз сучасних техніко-технологічних рішень сівби сидератів. *Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі : зимові диспути : тези доп. II міжнар. наук.-практ. інтер.-конф. журналу «WayScience» (4-5 лютого 2021 р).* Дніпро, 2021. Т.1. С. 293–296.

References

1. Hevko, B.M., Pavelchuk, Yu.F., Lototskyi, R.I. & Navrotska, T.D. (2013). Tekhnolohichnist konstruktсии odnozernovykh vysivnykh aparativ sivalok [Manufacturability of single-grain sowing machines of seeders]. *Silskohospodarski mashyny*, 24, 61–67. [in Ukrainian].
2. Hevko, B.M., Liashuk, O.L., Pavelchuk, Yu.F., Pryshliak, V.M. & etc. (2014). *Tekhnolohichni osnovy proektuvannia ta vyhotovlennia posivnykh mashyn : monohrafiia [Technological bases of design and manufacture of sowing machines]*. Ternopil: Vyd. TNTU imeni Ivana Puliuia. [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, Ju.F., Gevko, B.M. (2016). Matematycheskaja model' dinamiki sistemy «semjaprovod-zerno» [Mathematical model of the dynamics of the "seed tube-grain" system]. *Teorija i praktika sovremennoj 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»*, 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]*. Candidate's thesis. Kirovohrad: KNTU. [in Ukrainian].
7. Kosinov, M.M., Amosov, V.V., Martynenko, S.A., Kyrychenko, A.M., Vinnik, O.L. (2012) Udoskonalennia konstruktсии pnevmatychnoho vysivnoho aparata z metoiu pokrashchennia yakosti sivby [Improving the design of the pneumatic sowing machine in order to improve the quality of sowing]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 42(1), 194–198. [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V., Pankov, A.A., Zamota, T.N. (2016). Nadjozhnost' rabochih processov tehnycheskih sredstv APK s jelementami pnevmoniki [Reliability of working processes of technical means of agro-industrial complex with elements of pneumonics]. *Tehnychnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv*, 5, 117–125. [in Ukrainian].
9. Boiko, A.I., Amosov, V.V. (2006). Eksperymentalne vyznachennia ratsionalnykh parametriv vakuumnoho pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparata [Experimental determination of rational parameters of vacuum pneumomechanical seeding machine]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s.-h. mashyn*, 36, 108–110. [in Ukrainian].
10. 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*, 37, 94–98. [in Ukrainian].
11. Sviren, M.O., Anisimov, O.V., Solovykh, Ye.K. (2015). Doslidzhennia parametriv 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*, 28, 223–229. [in Ukrainian].
12. Lisovyi, I.O., Boiko, A.I., Sviren, M.O., Pushka, O.S. (2015). Priama sivba ta obgruntuvannia parametriv soshnyka [Direct sowing and substantiation of opener parameters]. *Visnyk Ukrainського viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity*, 3, 176–189. [in Ukrainian].
13. 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*, 40, Chast. II, 271–277. [in Ukrainian].
14. Luzan, O.R., Salo, V.M., Luzan, P.H., Leshchenko S.M. (2012). Obgruntuvannia parametriv posivnoi sektsii dlia priamoj sivby zernovykh kultur [Substantiation of parameters of sowing section for direct sowing of grain crops]. *Tekhnichni nauky. Vinnytsia: VNAU. Vyp.* (11), 2 (66), 217–222. [in Ukrainian].
15. Pavelchuk, Yu.F. (2009). *Obgruntuvannia parametriv soshnykiv dlia sivby zernovykh kultur pidhruntovo-rozkydnym sposobom [Substantiation of opener parameters for sowing grain crops by subsoil-spreading method]*. Candidate's thesis. Kamianets-Podilskyi. [in Ukrainian].



16. Hevko, B.M., Pavelchuk, Yu.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, 24, 25-32. [in Ukrainian].
17. Rud, A.V., Pavelchuk, Yu. F.I., Moshenko, O. (2010). Vplyv sposobu podachi nasinnia v kameru rozsyvu 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*, 144, 288–295. [in Ukrainian].
18. Shustik, L., Haidai, T. (2012). Poshuk alternatyvnykh enerhooshchadnykh tekhnolohii i doslidzhennia dlia posivu dribnonasinnievnykh 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*, 16 (30). Knyha 2, 116–119. [in Ukrainian].
19. Mini-sivalka BioDrill na kultyvatorakh Vaderstad naibilsh ekonomichnyi sposib posivu syderalnykh kultur i ozymoho ripaku (2012). [Mini-drill BioDrill on Vaderstad cultivators the most economical way of sowing green manure and winter rape]. *Zemledelets*, 4, 18–23. [in Ukrainian].
20. 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: VNAU, 133–135. [in Ukrainian].
21. 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*, 2 (98), 40–43. [in Ukrainian].
22. Naumenko, M.M., Derkach, O.D. (2017). Pobudova matematychnoi modeli protsesu vzaiemodii dyskovo-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 roslыnnystva*, 181, 267–274. [in Ukrainian].
23. Derkach, O.D., Makarenko, D.O. (2017). Teoretychniperedumovy do obgruntuvannia rezhymiv roboty paralelohramnoho kopiiuvalnoho mekhanizmu [Theoretical prerequisites for substantiation of the modes of operation of the parallelogram copying mechanism]. *Molodezh y silskokhoziaistvennaia tekhnika v XXI veke : XIII Mezhdun. forum molodezhy*. Kharkiv: KhNTUSH, 61. [in Ukrainian].
24. Derkach, O.D., Naumenko, M.M. (2017). Teoretychne obgruntuvannia rezhymiv roboty paralelohramnoho kopiiuvalnoho mekhanizmu [Theoretical substantiation of the modes of operation of the parallelogram copying mechanism]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn ta obladnannia*. Kropyvnytskyi : TsNTU, 13–16. [in Ukrainian].
25. 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].
26. 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]*. Kyiv : Ahrosvita. [in Ukrainian].
27. Ripka, I.I., Semen, Ya.V., Krupych, O.M., Bendera, I.M., Rud, A.V. (2013). *Osnovy mekhanizatsii silskohospodarskoho vyrobnytstva [Fundamentals of mechanization of agricultural production]*. Lviv : LNAU. [in Ukrainian].
28. Hrushetskyi, S.M., Slotvinska, N.Ia. (2021). Kontseptsiiia ta systemo-analohova model funktsionuvannia kombinovanoho hruntoobrobno-posivnoho ahrehata [Concept and system-analog model of operation of the combined tillage and seeding unit]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstruktsii ta tekhnichnoho servisu silskohospodarskykh mashyn i znariad*. Zhytomyr : ATK, 39–41. [in Ukrainian].
29. Hrushetskyi, S.M. Slotvinska, N.Ia. (2021). Analiz suchasnykh tekhniko-tekhnolohichnykh rishen sivby syderativ [Analysis of modern technical and technological solutions for sowing greens]. *WayScience* (4-5 liutoho). Dnipro, T.1. 293–296. [in Ukrainian].

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

To date, sowing is one of the most urgent tasks, therefore, universal sowing equipment is widely in demand, which should ensure a uniform distribution of the number of plants per unit area to create the same conditions for development.



Theoretical studies were carried out using the methods of theoretical mechanics, strength of materials, probability theory, mathematical analysis and modeling. Research is carried out on the basis of numerous implementations of the equations of continuum dynamics in applied engineering calculation programs - CAE systems.

The article provides a theoretical analysis of the interaction of the soil layer with the surface of the working body of the seeder for the implementation of the technological process of sowing seeds of grain crops on the slopes. We have obtained a diagram of the forces acting on the soil during the working process, a diagram of the forces acting on the soil layer while moving along the slope, a diagram for determining the parameters of the working plane, initial and limiting conditions for the interaction of the working body with the soil environment, a diagram for determining the speed of the soil layer, a diagram changes in the speed of the soil layer on the slopes, the scheme of forces acting on the soil layer on the slopes, the dependence of the gravity force of the soil layer on the surface of the working body and the backing force on the angle of the slope, the dependence of the backing force on the angle. The initial and limiting conditions of the mathematical model of the technological process are considered, and a technique for implementing the mathematical model of the technological process of the work of the working body on slopes with different values of the angle of inclination 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 limiting conditions of the mathematical model of the technological process of processing are established, taking into account the slope of the working surface of the field.

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

F. 19. Fig. 11. Ref. 29.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Грушецький Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., Україна, 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6434-1213>).

Павельчук Юрій Федорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., Україна, 32316, e-mail: yuriy3372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5028-8151>).

Бабин Ігор Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

Ляшук Олег Леонтійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобілів» Тернопільського національного університету імені Івана Пулюя (вул. Руська, м. Тернопіль, Україна, 5646001, oleglashuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>).

Sergiy Hrushetskiy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and System Engineering Podilsky State Agrarian and Technical University (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, Ukraine, 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6434-1213>).

Yuriy Pavelchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and System Engineering Podilsky State Agrarian and Technical University (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, Ukraine, 32316, e-mail: yuriy3372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5028-8151>).

Ihor Babyn – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

Oleg Lyashuk – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of “Automobiles” of Ternopil National University named after Ivan Puluj (Russkaya Str., Ternopil, Ukraine, 5646001, e-mail: oleglashuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>).