

УДК 631.31:634

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.173917

## Визначення параметрів щітки з поліпропіленовим ворсом при розкритті кореневої системи маточних рослин

А. В. Войтік, В. В. Кравченко, Р. В. Оляднічук, О. С. Пушка, С. В. Кюрчев, О. М. Іванов, Р. М. Харак, О. О. Назаренко

*Розглянуто питання роботи циліндричної щітки з гнучкими прутками ворсу при розкритті кореневої системи маточних рослин. Встановлено, що основними складовими сили опору при роботі даної щітки є сума опорів, що спричинені силою в'язкості ґрунту, силою статичного опору сипучих частинок ґрунту та силою опору відкидання частинок ґрунту. Виходячи з мінімізації затрат енергії визначено оптимальні кінематичні параметри щітки з вертикальною віссю обертання. Великий вплив на значення загальної сили опору має кут швидкості щітки. Крім сили опору на прутки ворсу щітки діє нормальна реакція ґрунтової основи. Знайшовши результуючу цих двох сил за допомогою методу еліптичних інтегралів Лежандра встановлено оптимальні розмірні параметри прутків ворсу, що виготовлені з поліпропілену. Даний метод дозволив врахувати значні, у порівнянні з довжиною прутків, їх деформації в результаті їх згину. Довжина прутків визначена як максимально можлива для забезпечення умови видалення ґрунту з валка, що вкриває кореневу систему маточних рослин клонових підщеп. Також досліджено вплив сили тертя під час роботи щітки. Це тертя частинок ґрунту між собою та по поверхні прутків ворсу. Визначено, що сили тертя, як і нормальна реакція ґрунту, мало впливають на роботу циліндричної щітки при розкритті кореневої системи маточних рослин. Це пояснюється відсутністю твердої основи при роботі прутка ворсу, що в свою чергу дозволяє розміщувати прутки ворсу по одному на поверхні щітки. Відсутність потреби у значній відносній жорсткості дозволяє пруткам ворсу видаляти ґрунт з валка мінімізуючи при цьому пошкодження рослин. За допомогою еліптичних інтегралів Лежандра другого роду досліджено прогин прутків ворсу циліндричної щітки при розкритті кореневої системи маточних рослин. Величина прогину прутка в процесі роботи впливає на повноту видалення ним частинок ґрунту. При збільшенні прогину змінюється кут між робочою гранню прутка ворсу і поверхнею ґрунту. Це призводить до зменшення видалення частинок і збільшення їх ущільнення у валку. Тому розрахована довжина прутків ворсу, які здатні забезпечити необхідні робочі параметри при заданому навантаженні*

*Ключові слова:* коренева система, маточні рослини, клонові підщепи, різання ґрунту, деформація згину

### 1. Вступ

Важливим етапом виробництва плодкових саджанців є вирощування підщеп. Найпоширенішими є клонові підщепи через їх здатність забезпечувати ви-

соку продуктивність саду. Однією з проблем при вирощуванні клонових підщеп залишається недостатній рівень механізації технологічних процесів. Одним з таких є розкриття кореневої системи маточних рослин з метою відокремлення відсадків.

Механізувати технологічний процес розкриття кореневої системи потрібно з врахуванням мінімального впливу робочих органів машин на маточні рослини. Розроблені пристрої механічної дії спричиняли значні пошкодження рослин, що часто призводило до їх загибелі. Пневматичні та пневмомеханічні засоби не дозволяли повністю розкрити кореневу систему і потребували застосування додаткової ручної праці. Ще одним недоліком таких засобів була вітрова ерозія ґрунту. Всі ці недоліки механізованих способів розкриття кореневої системи маточних рослин призвели до того, що сьогодні дану операцію виконують вручну.

Робочі органи у вигляді активних циліндричних щіток з гнучкими прутками ворсу мають ряд переваг. Це відсутність вітрової ерозії, майже відсутнє пошкодження маточних рослин та можливість видаляти до 95 % ґрунту в зоні росту кореневої системи. Підвищити якість роботи таких робочих органів, а відповідно і ефективність технології виробництва клонових підщеп в цілому, можна визначивши оптимальні конструктивні та кінематичні параметри щіткових пристроїв.

Тому актуальними є дослідження, що спрямовані на вдосконалення технічних засобів для механізації процесу розкриття кореневої системи маточних рослин. Такі дослідження мають важливе значення для розвитку виробництва плодового посадкового матеріалу.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Динаміка проникнення тіла в середовище на великій швидкості, що відповідає лінійним значенням при роботі щіток, досліджена в роботі [1]. Проте, при розкритті кореневої системи потрібно розглядати комбіноване середовище, що має властивості сипучості та пластичності. Пластичні деформації, що виникають при обробці ґрунту, викликають додаткові сили опору, що збільшують навантаження на робочі органи.

Роботу гнучких елементів під час обробки ґрунту розглянуто в роботі [2]. Однак досліджувалась робота металевих пружних стійок з великою площею поперечного перерізу, що мають відмінні фізико-механічні властивості у порівнянні з поліпропіленом.

В роботі [3] запропоновано модель вибору конструкції саме щіткового ротаційного робочого органу. Хоча тут і розглядався ворс в якості робочих елементів щітки та модель справедлива для металевих прутків ворсу, а не пропіленових. Також вирішувалася задача видалення частинок іржі з металу і модель потребує уточнення для умов видалення частинок ґрунту.

Вплив технологічних параметрів і типу волокон щітки досліджувався в роботі [4]. Встановлено, що ці параметри значною мірою впливають на інтенсивність взаємодії щітки з металевою поверхнею, що обробляється. Проте, як і в

попередній роботі, потрібні додаткові дослідження для того, щоб встановити справедливі залежності для ґрунтових поверхонь.

Динамічні моделі роботи щіткових пристроїв з врахуванням тривимірного великого прогину досліджені в роботі [5]. Врахована взаємодія як ворсу з поверхнею, так і ворсинок між собою. Всі розрахунки проведені для щіток з вертикальною віссю обертання. Невирішеним залишилося питання взаємодії ворсу з частинками, які видаляються щіткою.

Розвиток дані дослідження отримали в роботі [6]. Визначений вплив коливання ворсу в процесі роботи на якість видалення дрібних частинок. Однак дослідження стосувалися в основному частинок гравію різного розміру, який веде себе як сипке середовище. Питання впливу пластичності середовища потребує подальшого розгляду.

Моделювання динамічних навантажень на щітку з гнучкими робочими елементами досліджувалося в роботі [7]. Регресивна математична модель дозволяє визначити характеристики роботи конічних щіток з вертикальною віссю обертання.

Дана робота отримала продовження в праці [8]. Було проаналізовано деформаційні та силові характеристики ворсу і встановлений взаємозв'язок між ними. Як і в роботах [4, 7], залишилися невіршеними питання роботи циліндричних щіток з вертикальною опорною поверхнею.

Вплив конструктивних параметрів щіткових пристроїв на якість очистки коренеплодів досліджено в роботі [9]. Встановлено, що ротаційна щітка підвищує ступінь очищення знижуючи при цьому енергозатрати на виконання процесу. Проте, залишилося не вирішеним питання впливу властивостей ґрунту або ґрунтової суміші.

Аналіз літературних джерел показує, що дослідження роботи щіток з поліпропіленовим ворсом при розкритті кореневої системи маточних рослин не проводилися. Використання металевого ворсу, роботу якого достатньо вивчено, неможливо з точки зору мінімізації пошкодження рослин. Також в роботах [1–9] увага приділяється роботі щіток з металом або сипким середовищем з великими частинками, порівняно з частинками ґрунту.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є створення моделі силової взаємодії поліпропіленових прутків ворсу циліндричної щітки з частинками ґрунту або субстрату при розкритті кореневої системи маточних рослин.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити силу опору, що відповідає за прогин прутків ворсу при роботі циліндричної щітки;
- встановити вплив кінематичних параметрів роботи щітки із гнучкими прутками ворсу на результуючу силу опору;
- визначити оптимальний спосіб розміщення прутків ворсу на поверхні щітки;
- визначити прогин прутків ворсу під час розкриття кореневої системи маточних рослин щіткою.

#### 4. Визначення складових сили опору при роботі циліндричної щітки та впливу кінематичних параметрів на її роботу

Видалення ґрунту з валка щіткою передбачає різання моноліту прутками ворсу або їх пучками, кришення ґрунту, його часткове ущільнення та видалення. В даному випадку різання проходить з відокремленням ґрунтової стружки. Точніше, при обертанні щітки прутки ворсу згинається і під дією сили пружності заглиблюється в ґрунт. Після виходу із зони контакту прутки випрямляється і виносить із собою відокремлені частинки ґрунту. Повне видалення ґрунту відбувається за рахунок наростання активної дії ворсин в процесі обертання щітки.

На рис. 1 показана схема процесу змітання ґрунту двома гнучкими елементами, що обертаються в одній площині змітання.

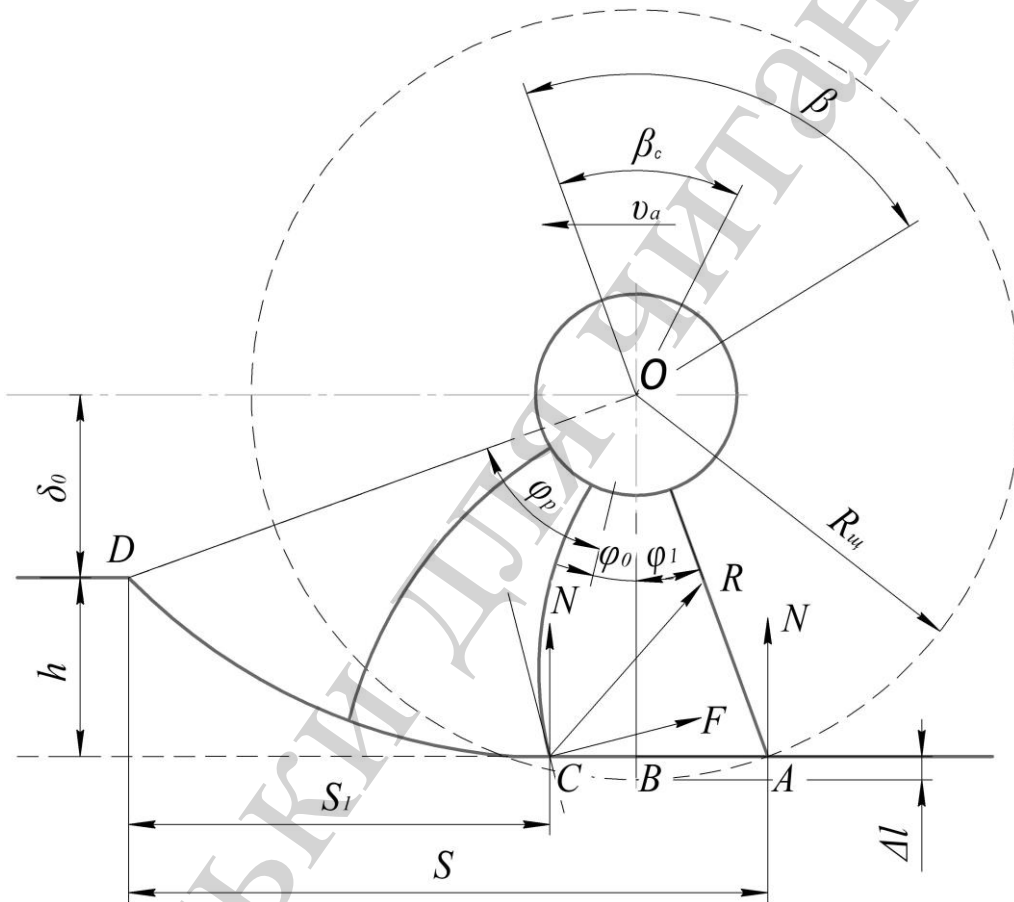


Рис. 1. Схема роботи щітки

При роботі ротаційної щітки потужність затрачується, в основному, на два процеси – це різання ґрунту (або субстрату) та відкидання частинок. Сила  $F$  опору ґрунту при роботі щітки залежить як від властивостей ґрунту, так і від конструктивних та кінематичних параметрів щітки [10–13].

$$F = f(\sigma, \tau, \rho, p, W, a, b, s, \vartheta_a, \omega, \vartheta), \quad (1)$$

де  $\sigma$  і  $\tau$  – граничні напруження стиску і зсуву, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – твердість ґрунту, Па;  $W$  – вологість ґрунту, %;  $a$ ,  $b$  – глибина та ширина різання, м;  $s$  – подача на один пруток ворсу, м;  $v_a$  – швидкість руху агрегату, м/с;  $\omega$  – кутова швидкість щітки, рад/с;  $v$  – абсолютна швидкість кінця прутка ворсу, м/с.

Із всіх цих параметрів можемо суттєво впливати саме на конструктивні та кінематичні параметри робочого органу. Параметри ж ґрунту хоч і можемо в деякій мірі змінювати та все ж будуть визначатися природньо-кліматичними умовами.

В загальному вигляді силу  $F_p$  опору ґрунту різанню можна записати як

$$F_p = \int_0^{S_c} \eta \frac{dv}{dx} dx + \frac{(\tau + \sigma) 2\pi a v_a \sin \alpha_i}{\text{tg} \varphi_T \omega z}, \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості ґрунту при зсуві, Н·с/м<sup>2</sup>;  $S_c$  – довжина ділянки зсуву, м;  $\varphi_T$  – внутрішній кут тертя частинок ґрунту, рад;  $z$  – кількість прутків ворсу в одному горизонтальному ряду щітки, шт.;  $\alpha_i$  – кут попороту щітки, рад.

Силу  $F_B$  на відкидання частинок ґрунту можна визначити з теореми про зміну кількості руху матеріальної точки і отримаємо

$$F_B = \frac{\pi a v_a \nu h k_{\text{від}}^2 \mu}{z \arccos \left( 1 - \frac{h}{R_{\text{щ}}} \right)}, \quad (3)$$

де  $k_{\text{від}}$  – відносний коефіцієнт, що враховує рух частинок ґрунту до і після контакту з прутком ворсу;  $\mu$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – товщина шару ґрунту, який потрібно видалити щітці, м;  $R_{\text{щ}}$  – радіус щітки, м.

Об'єднавши рівняння (2) і (3) отримаємо значення загальної сили опору при роботі щітки по видаленню частинок ґрунту з валка, що вкриває кореневу систему маточних рослин.

$$F = \frac{\pi v_a}{z} \left( \frac{2 \sin \alpha}{\omega} (\eta v + ([\tau] + \sigma) a) + \frac{a \nu h k_{\text{від}}^2 \mu}{\arccos \left( 1 - \frac{h}{R_{\text{щ}}} \right)} \right). \quad (4)$$

Досить часто в розрахунках ротаційних робочих органів нехтують силою тертя. Хоча попередні дослідження [14, 15] довели, що на тертя затрачається 3–7 % від загальних затрат енергій на привід робочого органу. Сама сила тертя має дві складові. Перша, тертя часток ґрунту по поверхні робочого органу – прутку ворсу. Другою складовою є тертя при переміщенні призми волочіння, що утворюється між прутком та ґрунтовою основою. В загальному силу тертя  $F_T$  при роботі щітки можна визначити з рівняння

$$F_{\tau} = g \mu f (abd\delta C_p + V_{\pi}), \quad (5)$$

де  $\delta$  – товщина ґрунтової стружки, м;  $C_p$  – коефіцієнт, що враховує кількість відкинутого ґрунту;  $V_{\pi}$  – об'єм призми волочіння, м<sup>3</sup>;  $f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по поліпропілену.

Дану силу тертя потрібно також врахувати при визначенні загальної сили опору ґрунту при роботі щітки.

Одночасно, на ділянці  $AD$  (рис. 1) на прутки ворсу починає діяти нормальна реакція ґрунтової основи  $N$ . Дана сила призводить до додаткової деформації ворсу, але саме від неї залежить на скільки глибоко ворсини зможуть проникати в ґрунт. Глибше проникнення спричинятиме краще розпушення ґрунту та ефективніше видалення частинок з валка.

Сила  $N$  наростає на ділянці  $AC$ . До цього часу збільшується і деформація ворсу. Далі за основне навантаження на ворсину відповідає сила  $F$  і нормальна реакція лише підтримує стале заглиблення прутка. На ділянці  $CD$  дві сили доповнюють одна одну і за виконання технологічного процесу відповідає їх результуюча  $R$ . Транспортування відокремлених частинок ґрунту прутком відбувається до точки  $D$  і потім, в результаті різкого випрямлення прутка, частинки відкидаються в радіальному напрямі.

Силу нормальної реакції ґрунтової основи можна визначити за наступною формулою:

$$N = 0,01Dk_E \left( \frac{E \cdot I}{l^2} \right) \Delta l^{-1} i_3 \cos^{-1} \left( 1 - 2 \frac{l}{R_{\text{щ}}} \right), \quad (6)$$

де  $D$  – діаметр щітки, м;  $i_3$  – кількість ворсинок в одному змітальному елементі;  $E$  – модуль пружності, Па;  $I$  – момент інерції поперечного перерізу прутка ворсу, м<sup>4</sup>;  $l$  – початкова довжина прутка ворсу щітки, м;  $\Delta l$  – величина прогину прутка ворсу, м;  $k_E$  – коефіцієнт, що враховує зменшення модуля пружності матеріалу ворсу в експлуатаційних умовах, який слід приймати:  $k_E = 0,6 \dots 1,0$ .

Модуль пружності для поліпропілену залежить як від способу його виготовлення, так і від характеру дія згинаючої сили. Користуючись рекомендаціями [16], можемо приймати значення  $2,9 - 3,2 \cdot 10^3$  МПа.

Одночасно, нормальна реакція ґрунтової основи відповідає і за збільшення сили тертя. Чим сильніше прогинається пруток ворсу, тим більше зусилля і площа його контакту з ґрунтом. Враховуючи те, що при роботі щітки деформації ворсу є значними, порівняно з його довжиною, визначимо і цю складову сили тертя [17].

$$F'_{\tau} = \frac{2EI \tan \theta}{l^2} f, \quad (7)$$

де  $F'_T$  – складова сили тертя, викликана нормальною реакцією ґрунтової основи, Н;  $\theta$  – кут між дотичною до робочою грані прутка ворсу і віссю недеформованого прутка, рад.

Враховуючи рівняння (4)–(7) результуючу  $R$  сили опору при роботі прутка ворсу циліндричної щітки можна записати як:

$$R = \sqrt{F_{\Sigma}^2 + \left(\frac{EI}{l^2} A\right)^2}, \quad (8)$$

де  $F_{\Sigma}$  – сумарна сила опору ґрунту, Н:

$$F_{\Sigma} = \frac{\pi v_a}{z} \left( \frac{2 \sin \alpha}{\omega} (\eta v + ([\tau] + \sigma) a) + \frac{a v h k_{\text{від}}^2 \mu}{\arccos \left(1 - \frac{h}{R_{\text{щ}}}\right)} + g \mu f (ab \delta C_p + V_{\text{п}}) \right), \quad (9)$$

$A$  – заміна, введена для скорочення рівняння:

$$A = 0,01 D k_E \Delta l^{-1} i_3 k_{\text{від}} \tan \theta f, \quad (10)$$

де  $k_{\text{в}}$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення довжини прутків ворсу до загального радіусу щітки.

$$k_{\text{в}} = \cos^{-1} \left( 1 - 2 \frac{l}{R_{\text{щ}}} \right). \quad (11)$$

Даний коефіцієнт потрібно визначати для кожного конкретного випадку залежно від розмірних параметрів щітки. Може носити наближений характер, коли потрібно розв'язати рівняння (8) відносно довжини прутків ворсу. В цьому випадку співвідношення довжини прутків ворсу до загального радіусу щітки можна приймати в межах 0,3...0,5. При визначенні інших параметрів, наприклад кінематичних, даний коефіцієнт буде мати точне значення і рівняння (8) матиме розв'язок.

Рівняння (8) враховує кінематичні та конструктивні параметри щітки, а також властивості ґрунту, з яким працює. Проте, хоча розмірні та механіко-технологічні властивості прутків ворсу теж частково враховані, але потрібно точніше врахувати деформації прутків під час роботи.

## 5. Визначення прогину прутків ворсу циліндричної щітки та оптимального способу їх розміщення

Загальні підходи теоретичної механіки, які розглядають згин консольно закріпленого стержня, в даному випадку не точно описують процес. В даному випадку маємо значний згин тонких прутків ворсу у порівнянні до їх довжини. Вирішити дану задачу можливо з використанням еліптичних інтегралів Лежандра першого роду, які описують стан деформованого пружного стержня. Даний метод враховує значні переміщення навантаженого кінця стержня відносно закріпленого.

З використанням еліптичних інтегралів Лежандра отримуємо значення результуючої сили опору при роботі прутка ворсу у наступному вигляді:

$$R = \left( \int_{\psi_0}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} \right)^2 H / l^2, \quad (12)$$

де  $H = EI$  – жорсткість прутка ворсу при згині,  $\text{H} \cdot \text{м}^2$ ;  $k$ ,  $\psi$  – відповідно модуль і амплітуду еліптичного інтегралу.

Модуль і амплітуда еліптичного інтегралу фактично залежать від одного показника. Це кут  $\theta$ , який і визначає ступінь деформації осі пружного стержня. Але обов'язково при їх визначення потрібно враховувати характер сили, що згинає даний стержень. Сила може бути направлена паралельно до осі недеформованого прутка, діє на стиск. В даному варіанті це складова нормальної реакції ґрунтової основи  $N$ . Сила може бути перпендикулярна осі, як у випадку роботи щітки сила опору ґрунту  $F_\Sigma$ . В результаті, для вірного визначення параметрів  $k$  та  $\psi$  потрібно врахувати кут, під яким розміщений вектор дії результуючої сили  $R$ .

Враховуючи вищесказане прирівняємо рівняння (8) та (12) і отримуємо наступну рівність:

$$\sqrt{F_\Sigma^2 + \left( \frac{H}{l^2} A \right)^2} = \left( \int_{\psi_0}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} \right)^2 H / l^2. \quad (13)$$

Дана рівність дозволяє визначити кінематичні та конструктивні параметри циліндричної щітки з вертикальною віссю обертання при розкритті кореневої системи маточних рослин. Враховує як властивості ґрунту, що вкриває кореневу систему, так і вплив значного прогину пружних прутків ворсу.

Для прикладу, визначити довжину прутків ворсу можливо з рівняння (13) можна за наступною формулою:

$$l = \sqrt[4]{\frac{H^2}{F_\Sigma^2} \left( \left( \int_{\psi_0}^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} \right)^4 - A^2 \right)}. \quad (14)$$



Встановлено, що кут  $\theta$  значно впливає на процес роботи щітки [18]. При його значеннях більше  $25^\circ$  підвищується нерівномірність роботи прутків ворсу в наслідок різких згинаючих напружень. Такі напруження викликають значні деформації прутків, спричиняють їх вібрації, що негативно відображається на виконанні технологічного процесу.

Кут  $\theta$  значною мірою залежить від жорсткості прутків ворсу та їх довжини. В свою чергу жорсткість залежить від матеріалу та розмірів поперечного перерізу прутків. Якщо брати для виготовлення щіток стандартний ворс, то впливати на значення кута  $\theta$  можна лише зміною довжини прутків.

Збільшення кута  $\theta$  відповідає збільшенню прогину прутка ворсу. Знайти дану величину можна використавши еліптичні інтеграли Лежандра другого роду.

$$\Delta l = l \left( 1 - \left( \left( \frac{2}{\beta} \int_{\psi_0}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} \cdot d\psi - 1 \right) \sin \theta + \frac{2}{\beta} k \cos \psi_0 \cos \theta \right) \right), \quad (15)$$

де  $\beta$  – силовий коефіцієнт при згині, який враховує як відносну жорсткість прутків ворсу, так і силу, що викликає їх згин:

$$\beta = \sqrt{Rl^2 / H}. \quad (16)$$

Початкове значення амплітуди еліптичного інтегралу  $\psi_0$  також залежить від кута  $\theta$ .

$$\psi_0 = \sin^{-1} \left( \frac{1}{k} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) \right). \quad (17)$$

Для того щоб рівняння (13) та (15) мали розв'язок необхідно задатися значенням кута  $\theta$  в межах від  $0$  до  $25^\circ$ .

## 6. Результати дослідження впливу параметрів циліндричної щітки на процес розкриття кореневої системи

Аналізуючи рівняння (12) можна зробити наступні висновки (рис. 2). Вагомий вплив на результуючу силу  $R$  має поступальна швидкість руху агрегату. Її збільшення в межах  $3 \dots 12$  км/год збільшує силу опору від  $0,3$  до  $1,5$  Н на кожен пруток ворсу. При чому, спостерігається не лінійна залежність і можна спрогнозувати ще більший ріст сили опору при збільшенні швидкості руху агрегату. Такий ріст пояснюється збільшенням подачі ґрунту на пруток ворсу за один його робочий цикл. Це повинно збільшити продуктивність щітки в цілому, але велике навантаження викликатиме більший прогин прутків ворсу і буде погіршувати та навіть унеможливити їх роботу. Більший прогин прутків буде збільшувати значення кута  $\theta$ , що при переході за межу в  $25^\circ$  зробить процес видалення ґрунту з валка нестійким. Одночасно збільшиться і ущільнення ґрунтової основи прутками ворсу, що також негативно відобразиться на повноті видалення ґрунту з валка.

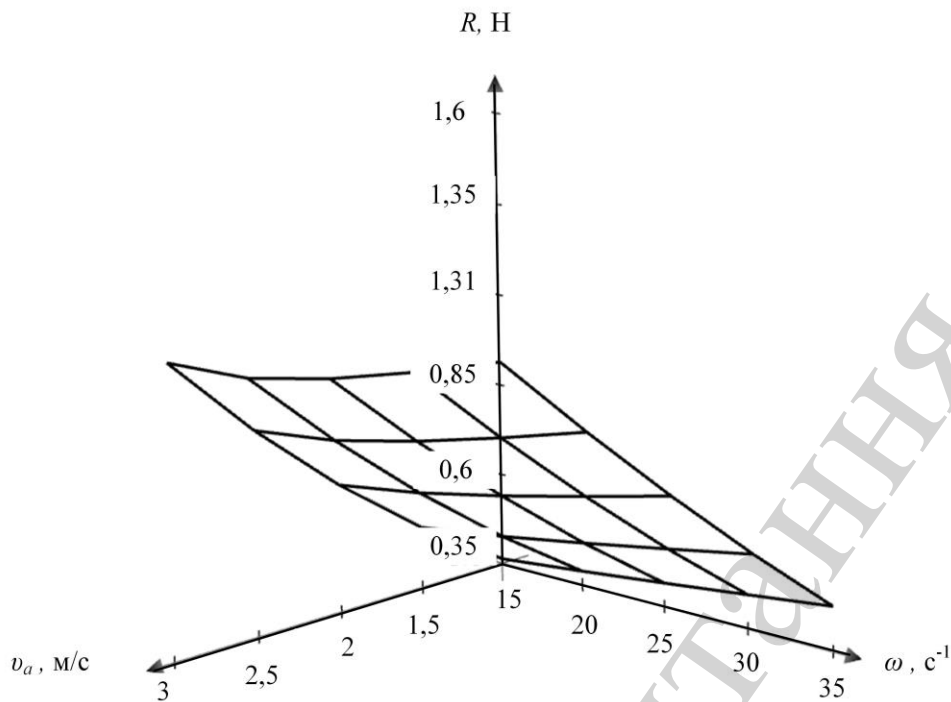


Рис. 2. Залежність результуючої сили опору переміщенню прутка ворсу від поступальної швидкості агрегату  $v_a$  та кутової швидкості щіток  $\omega$

Збільшення кутової швидкості щітки  $\omega$  не вирішує проблему навантаження на прутка ворсу. Хоча подача ґрунту при цьому і зменшується та відбувається зростання абсолютної швидкості кінця прутка. Це в свою чергу призводить до росту загальної сили опору. При збільшенні кутової швидкості від 15 до 35  $\text{с}^{-1}$  маємо збільшення результуючої  $R$  в межах 0,35...0,45 Н. Аналізуючи графік на рис. 2 бачимо, що оптимальним є значення кутової швидкості щітки в 20  $\text{с}^{-1}$ .

За допомогою графічного аналізу рівняння (14) було визначено вплив поступальної швидкості руху  $v_a$  та кількості прутків  $i$  ворсу у пучках щітки на максимально можливу довжину прутків (рис. 3). Основною умовою було дотримання значення кута  $\theta$  в межах до 25° щоб забезпечити максимально ефективний режим роботи прутків ворсу.

Встановлено, що при швидкості руху агрегату 3 м/с або близько 12 км/год максимально можливою є довжина прутків ворсу в 120 мм. Тоді, як при швидкості 7 км/год можна використати більш довгі прутки – до 160 мм. А при зменшенні швидкості руху до 3,5 км/год діапазон можливої довжини прутків ворсу різко зростає. В цьому випадку маємо максимально доступними прутки довжиною до 240 мм.

Розміщення прутків ворсу пучками не має впливу на можливу довжину прутків. Це пояснюється незначним впливом нормального реакції ґрунтової основи  $N$  на загальну силу опору  $R$ . В загальному, сила  $N$  становить 1–2 % від  $R$ . Щітка намагається повністю видалити весь ґрунт і з основою валка майже не взаємодіє. Тому, для кращої рівномірності роботи щітки прутки потрібно по одному рівномірно закріпити на всій її поверхні у шаховому порядку.

Відповідно до рівняння (15) на рис. 4 наведено графічну залежність прогину  $\Delta l$  прутків ворсу залежності від їх довжини  $l$  та робочої швидкості агрегату  $v_a$ .

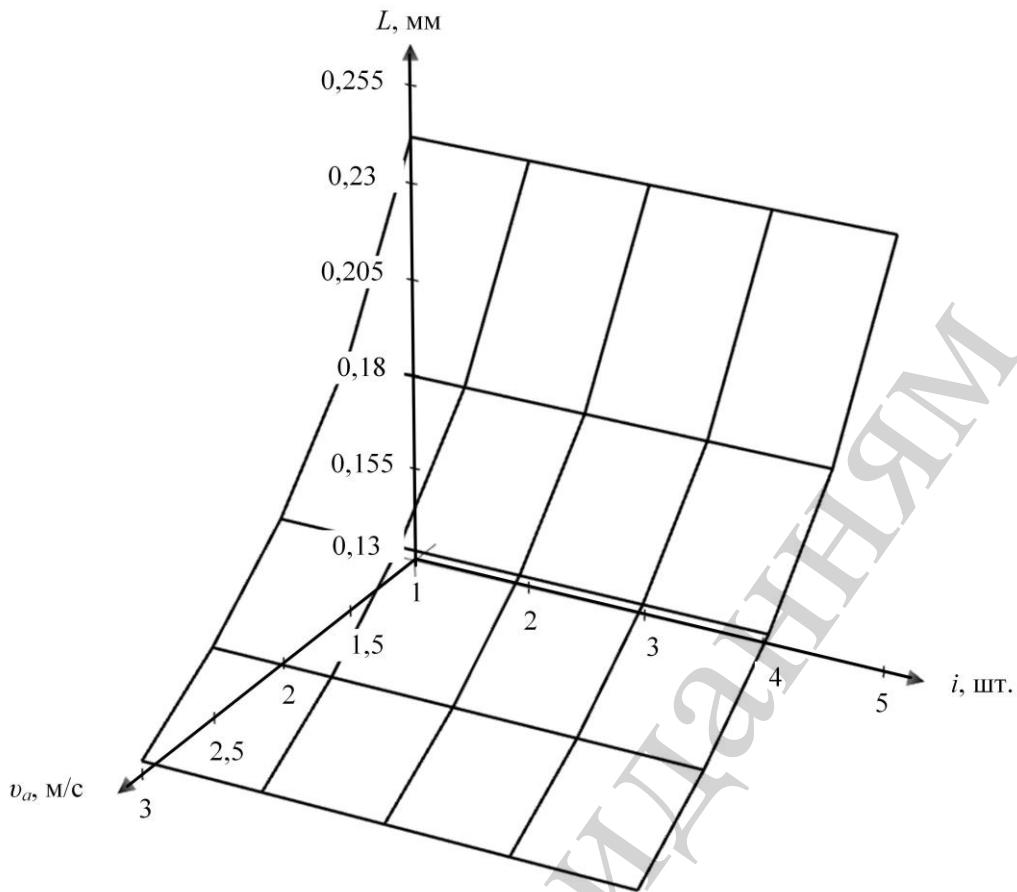


Рис. 3. Залежність довжини прутка ворсу від поступальної швидкості агрегату  $v_a$  та кількості ворсинок у пучку  $i$

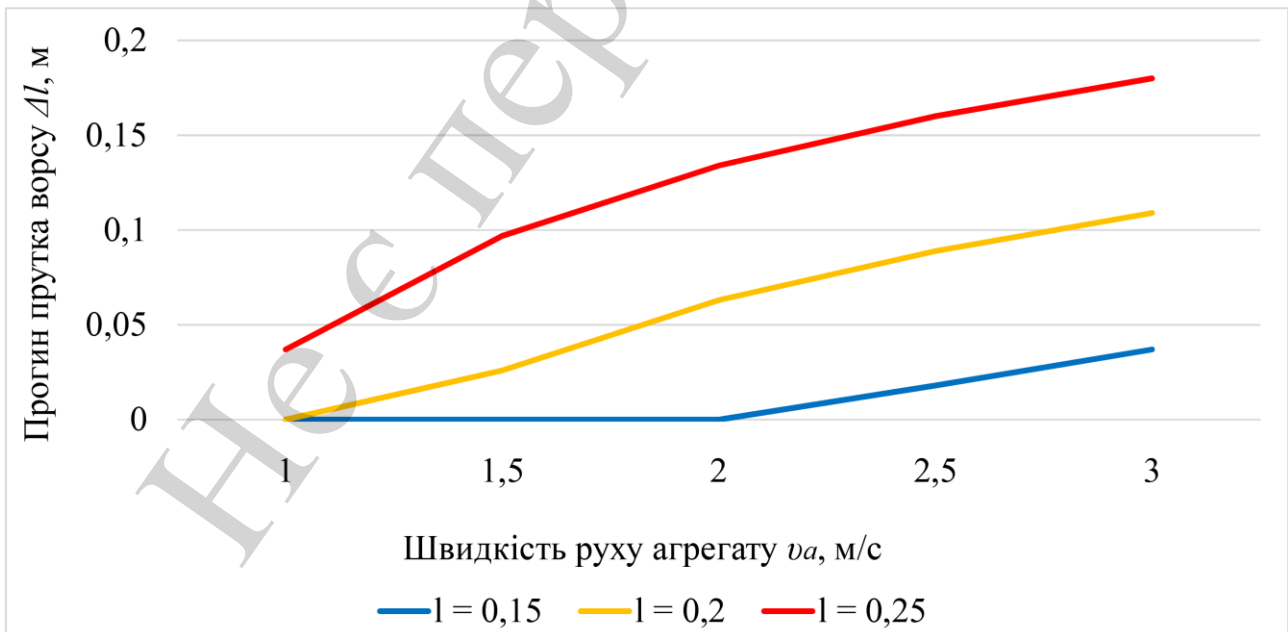


Рис. 4. Залежність прогину  $\Delta l$  прутків ворсу залежності від їх довжини  $l$  та робочої швидкості агрегату  $v_a$

Графічний аналіз рівняння (15) показав, що збільшення довжини прутків ворсу призводить до росту їх прогину при однаковому значенні сили, що його викликає. Так, як сила опору значною мірою залежить від швидкості руху машини, то і прогин також має залежність від цього параметру. Прутки довжиною 150 мм починають прогинатися при значенні швидкості руху в 2 м/с, що відповідає результуючій силі опору в 0,85 Н на кожен ворсинку. В той же час, прутки довжиною 250 мм при даних значеннях швидкості руху, а відповідно і результуючої сили опору, мають прогин в 140 мм. Ця величина співрозмірна з довжиною самого прутка. При таких значеннях прогину робота щітки ускладнюється і є раціональним зменшення згинаючої сили шляхом зменшення швидкості руху агрегату. Для прутків ворсу довжиною 200 мм швидкість не повинна перевищувати 1,5 м/с, а для прутків довжиною 250 мм – 1 м/с.

## **7. Обговорення результатів дослідження параметрів поліпропіленових прутків ворсу циліндричної щітки**

При розкритті кореневої системи маточних рослин визначальний вплив на роботу щітки з гнучким ворсом має саме опір ґрунту. Сюди відносяться сили опору деформації, зсуву та відкиданню частинок ґрунту з валка, а також їх тертя між собою. Всі ці складові сили опору значною мірою залежать від абсолютної швидкості руху робочої грані прутка ворсу. Зважаючи на значну різницю в значеннях поступальної швидкості руху машини та кутової швидкості щітки, саме остання в основному визначає абсолютну швидкість руху і впливає на значення сили опору.

Нормальна реакція ґрунту має незначний вплив на результуючу силу опору через відсутність твердої основи, по якій би рухалися прутки ворсу. Це явище має місце при роботі щіток з металом, твердим дорожнім покриттям та іншими твердими поверхнями. В цьому випадку є доцільним розміщувати прутки ворсу в пучках по декілька штук для підвищення загальної жорсткості. Будучи більш жорстким пучок ворсин менше прогинається і краще виконує свою роботу.

При видаленні ґрунту з насипного валка, де відсутня тверда основа, прутки ворсу розміщувати пучками не доцільно. Краще їх розміщувати по одному рівномірно на поверхні щітки. Маючи мещу жорсткість, прутки ворсу чинять менший механічний вплив на рослини, що лише позитивно відображається на якості виконання технологічної операції.

Існуючі дослідження не враховували саме такі властивості оброблюваної поверхні, якою є валок з ґрунту або субстрату (суміш ґрунту, піску і деревної тирси). Також, для точного визначення довжини окремо закріпленого поліпропіленового прутка ворсу, використано метод еліптичних інтегралів. Даний метод є більш точнішим за класичні методи теоретичної механіки для визначення прогину консольно закріплених стержнів.

В процесі роботи прутків ворсу може прогинатися на величини співрозмірні навіть з його довжиною. Метод еліптичних інтегралів дозволяє врахувати саме такі величини прогину. Враховуючи силове навантаження на пруток, можемо визначити максимальну допустиму його довжину, при якій буде відбуватися видалення частинок ґрунту.

Саме така математична модель дозволяє вирішити поставлені задачі. Вона враховує властивості ґрунту як об'єкту обробітку, можливість значного прогину ворсу, що надає їй переваги над існуючими.

Дана модель має також обмеження. Радіус щітки, який потрібен для розрахунків, залежить від довжини прутків ворсу. Ним потрібно задатися і коригувати за допомогою радіуса маточини щітки.

Також, для розв'язання моделі, потрібно задатися значенням кута між робочою гранню прутка і поверхнею ґрунту. Оптимальним з точки зору якості виконання процесу є значення  $90^\circ$ . Але в процесі роботи прогин прутка змінюється і даний показник теж може змінюватися. А він, в свою чергу, буде впливати на кут прикладання результуючої сили опору. Обидва ці показники впливають на значення амплітуди і модуля еліптичного інтегралу.

Недоліками моделі є те, що не враховується вібрації прутків ворсу під час роботи, опір повітря та вологість ґрунту. Всі ці критерії потрібно врахувати в наступних дослідженнях.

Також, розвиток даної роботи може полягати у визначенні продуктивності та енергоємності при роботі циліндричної щітки з ґрунтовими валками.

## 8. Висновки

1. Визначена залежність сили опору  $R$  переміщенню прутка в ґрунту від основних параметрів щітки. Це сума опорів, що спричинені силою в'язкості ґрунту, силою статичного опору частинок ґрунту, силою опору відкидання частинок ґрунту, силою тертя та нормальною реакцією ґрунту. Теоретичні дослідження показали, що нормальна реакція ґрунту при розкритті кореневої системи маточних рослин щіткою не перевищує значення в 2 % від загальної сили опору.

2. Кутова швидкість щітки не має великого впливу на значення загальної сили опору. Це пов'язано з одночасним зменшенням подачі ґрунту на один пруток та збільшенням абсолютної його швидкості руху. Раціональним є значення кутової швидкості до  $25 \text{ с}^{-1}$ . В цьому діапазоні буде спостерігатися найменша сила опору.

На відміну від кутової швидкості щітки поступальна швидкість руху агрегату має визначальний вплив на загальну силу опору. Щоб забезпечити мінімальні затрати енергії та стійку і плавну роботу прутків ворсу не потрібно перевищувати швидкість руху понад  $2 \text{ м/с}$ .

3. Розміщення прутків ворсу пучками не дає позитивного ефекту з точки зору зменшення сили опору при розкритті кореневої системи маточних рослин. Це пояснюється відсутністю твердої основи для ковзання кінців прутків ворсу. Для рівномірної роботи щітки в даному випадку прутки краще розміщувати по одному у шаховому порядку.

4. Встановлено, що поступальна швидкість руху агрегату значно впливає і на прогин прутків ворсу циліндричної щітки з вертикальною віссю обертання. Коротші прутки ворсу здатні працювати з незначним прогином при більш високих швидкостях. Це пояснюється їх більшою відносною жорсткістю. А тому, при виборі швидкості руху машини для розкриття кореневої системи потрібно обов'язково враховувати довжину ворсу на щітках.

## Література

1. Borg, J. P., Morrissey, M. P., Perich, C. A., Vogler, T. J., Chhabildas, L. C. (2013). In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: Experimental measurements and continuum simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 51, 23–35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.07.009>
2. Lisowski, A., Klonowski, J., Green, O., Świętochowski, A., Sypuła, M., Strużyk, A. et. al. (2016). Duckfoot tools connected with flexible and stiff tines: Three components of resistances and soil disturbance. *Soil and Tillage Research*, 158, 76–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.12.003>
3. Wang, C., Guo, H., Zhao, Y., Sun, Q., Zhao, L. (2018). Statistical Analysis of Industrial Grinding Brush Force Characteristics Based on Finite Element Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/7362705>
4. Matuszak, J. (2017). The Effect of Machining Conditions on the Forces in the Process of Roller Brush Machining. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11 (4), 294–300. doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/80847>
5. Vanegas-Useche, L. V., Abdel-Wahab, M. M., Parker, G. A. (2011). Dynamic finite element model of oscillatory brushes. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47 (7), 771–783. doi: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.02.008>
6. Vanegas-Useche, L. V., Abdel-Wahab, M. M., Parker, G. A. (2015). Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste. *Waste Management*, 43, 28–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.014>
7. Wang, C., Sun, Q., Wahab, M. A., Zhang, X., Xu, L. (2015). Regression modeling and prediction of road sweeping brush load characteristics from finite element analysis and experimental results. *Waste Management*, 43, 19–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.027>
8. Wang, C., Sun, Q., Xu, L. (2017). Analysis of helical abrasive brush filament force characteristics for surface treatment processes. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (7), 168781401771598. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017715980>
9. Nuralin, B., Bakushev, A., Janaliev, Y., Dussenov, M., Kubasheva, Z., Omarova, N., Zakharov, V. (2018). Constructive-regime parameters of rotor-brush cleaner for tuberous roots dry cleaning. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40 (2). doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1004-0>
10. Ветохин, В. И., Панов, И. М., Шмонин, В. А., Юзбашев, В. А. (2009). Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины. Киев: Феникс, 264.
11. Зенков, Р. Л. (1978). Механика насыпных грузов. Москва: Машиностроение, 375.
12. Шукле, Л. (1976). Реологические проблемы механики грунтов. Москва: Машиностроение, 483.
13. Сагамонян, А. Я. (1974). Проникание. Москва: Изд-во Московского университета, 299.
14. Карасев, Г. Н. (2011). Новые положения теории резания грунтов. Электронное издание СДМ - строительные дорожные машины и техника. URL: <http://sdm.str-t.ru/publics/73/>

15. Курилов, Е. В. (2014). Экспериментально-аналитическая модель копания грунта отвалом бульдозера. Электронное издание СДМ - строительные дорожные машины и техника. URL: <http://sdm.str-t.ru/publics/87/>

16. Нарисава, И. (1987). Прочность полимерных материалов. Москва: Химия, 398.

17. Панов, И. М., Ветохин, В. И. (2008). Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 265.

18. Попов, Е. П. (1986). Теория и расчёт гибких и упругих стержней. Москва: Наука, 264.

Не є перевиданням