

УДК 631.356.24

В.М. Барановський, О.Ю. Скальський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОПУВАННЯ КРИХКИХ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦИКОРІЮ

Розробка робочих органів, які забезпечують мінімальні пошкодження та задовільну повноту збирання коренеплодів цикорію корневого є актуальним науковим завданням. Важливою передумовою ефективності розробки робочих органів для викопування коренеплодів цикорію є врахування їх агробіологічних і фізико-механічних властивостей. Вони суттєво корегують механіко-технологічні процеси та явища, які характерні для робочих процесів складних динамічних систем «коренеплід-робочий орган-грунтове середовище». Розвиток концепції та алгоритму побудови раціональних обрисів сучасних копачів можливий на основі подальшого аналізу технологічного процесу викопування коренеплодів. Це досягається на основі поглибленої ідентифікації функціонування робочих процесів і удосконалення робочих органів для викопування коренеплодів. В статті наведено результати теоретичного аналізу загальних принципів викопування крихких коренеплодів з умови мінімізації їх пошкодження. Отримано математичні моделі, які характеризують загальну умову викопування коренеплодів цикорію та умову викопування коренеплодів з мінімальними пошкодженнями. Встановлено, що сила викопування коренеплодів цикорію залежить від діаметра коренеплодів, висоти шару налиплого ґрунту і кута конуса росту коренеплоду та знаходиться у межах 25...39 Н. Результати досліджень є подальшим кроком розробки методології обґрунтування параметрів робочих органів копачів коренеплодів.

Ключові слова: ґрунтове середовище, динамічна система, налиплий ґрунт, сила викопування, коефіцієнт тертя, пошкодження коренеплодів.

В.Н. Барановский, А.Ю. Скальский**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫКАПЫВАНИЯ ХРУПКИХ КОРНЕПЛОДОВ ЦИКОРИЯ**

Разработка рабочих органов, обеспечивающих минимальные повреждения и удовлетворительную полноту уборки корнеплодов цикория корневого, является актуальной научной задачей. Важной предпосылкой эффективности разработки рабочих органов для выкапывания корнеплодов цикория есть учет их агробиологических и физико-механических свойств. Они существенно корректируют механико-технологические процессы и явления, которые характерны для рабочих процессов сложных динамических систем «корнеплод-рабочий орган-почвенная среда». Развитие концепции и алгоритма построения рациональных очертаний современных копателей возможен на основе дальнейшего анализа технологического процесса выкапывания корнеплодов. Это достигается путем углубленной идентификации функционирования рабочих процессов и совершенствования рабочих органов для выкапывания корнеплодов. В статье приведены результаты теоретического анализа общих принципов выкапывания хрупких корнеплодов из условия минимизации их повреждения. Получены математические модели, характеризующие общее условие выкапывания корнеплодов цикория и условие выкапывания корнеплодов с минимальными повреждениями. Установлено, что сила выкапывания корнеплодов цикория зависит от диаметра корнеплодов, высоты слоя налипшей почвы и угла конуса роста корнеплода и находится в пределах 25...39 Н. Результаты исследований являются последующим шагом разработки методологии обоснования параметров рабочих органов копателей корнеплодов.

Ключевые слова: почвенная среда, динамическая система, налипшая почва, сила выкапывания, коэффициент трения, повреждения корнеплодов.

V. Baranovsky, O. Skalsky**THEORETICAL ASPECTS OF DIGGING OUT FRAGILE CHICORY ROOT CROPS**

The development of working organs that ensure minimum damage and satisfactory completeness of the collection of roots of chicory root is an actual scientific task. An important prerequisite for the effective development of working organs for digging out the roots of chicory is the consideration of their agrobiological and physico-mechanical properties. They substantially correct the mechanical and technological processes and phenomena that are characteristic for working processes of complex dynamic systems "root crop-working organ-soil medium". The development of the concept and algorithm for constructing rational outlines of modern diggers is possible on the basis of further analysis of the technological process of digging out root crops. This is achieved on the basis of an in-depth identification of the functioning of working processes and the improvement of working organs for digging out root crops. The article presents the results of a theoretical analysis of the general principles of digging out fragile root crops from the condition of minimizing their damage. Mathematical models are obtained that characterize the general condition for digging out the roots of chicory and the condition for digging up root crops with minimal damage. It has been established that the power of digging out the roots of chicory depends on the diameter of the root crops, the height of the layer of adhered soil and the angle of the root growth cone, and is within 25...39 N. The results of the research are the next step in the development of a methodology for justifying the parameters of the working organs of diggers of root crops.

Keywords: soil environment, dynamic system, adhered soil, digging force, coefficient of friction, root crop damage.

Постановка проблеми. У технологічному процесі виробництва коренеплодів цикорію корневого, який є цінною лікарською, харчовою, технічною та кормовою культурою, однією з найбільш трудомістких операцій є механізоване збирання, на яке припадає близько 40...50 % усіх затрат праці [1]. Виробництво продукції переробки цикорію було провідною та традиційною галуззю

агропромислового комплексу України.

Корені цикорію використовують у фармацевтичній, кавовій, спиртовій та кондитерських галузях промисловості, а їх своєчасне збирання в оптимальні агротехнічні строки при мінімальних втратах і затратах праці – одна із важливих сучасних задач розробки збиральних машин. Основною причиною зниження виробництва цикорію є недосконалість техніки для їх збирання та невідповідність показників якості її роботи агротехнічним вимогам.

Механізоване збирання застарілими комплексами бурякозбиральних машин призводить до значних втрат коренів цикорію, які можуть становити 45...60 % і незадовільних показників якості очищення коренеплодів від домішок (12...18 %) залежно від ґрунтово-кліматичних умов збирання [2]. Застосування сучасних самохідних комбайнів провідних зарубіжних фірм на незначних посівних площах цикорію практично нерентабельне у зв'язку з значною купівельною вартістю таких машин – 650...800 тис. грн за одиницю.

Використання існуючих технічних засобів, призначених для викопування коренеплодів цикорію та застосування ручної праці на окремих технологічних операціях збирання, що характерно для колективних і фермерських господарств, значно збільшує використання енергоресурсів та суттєво знижує економічні показники і рентабельність умов господарювання.

Одним із резервів підвищення технологічних показників якості роботи коренезбиральних машин є удосконалення технологічного процесу викопування коренеплодів цикорію шляхом застосування комбінованих викопувальних робочих органів, які поєднують у собі систему сферичного диска з горизонтальним валом та встановленого за ним розрихлюючого пристрою, що дозволяє підвищити технологічну ефективність та інтенсифікувати процес викопування коренеплодів цикорію [3].

Поставлені завдання вирішуються на основі подальшого удосконалення методології та методики оптимізації технологічних показників процесу викопування і конструктивно-кінематичних параметрів та режимів роботи копачів коренеплодів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз сучасного стану функціонування гвинтових транспортних механізмів [3-8] показав, що існують значні передумови для проведення подальших наукових робіт, які спрямовані на розробку, дослідження та впровадження в виробництво енергозберігаючих, високотехнологічних комбінованих копачів, які забезпечують ефективне виконання суміжних функціональних операцій, як викопування, так і одночасного видалення залишків гички з головок коренеплодів.

Відсутність узагальнених аналітичних моделей процесу функціонування робочих елементів комбінованого копача, які одночасно виконують операції викопування та очищення головок коренеплодів від залишків гички зумовило проведення даних досліджень.

Постановка завдань. Метою досліджень є удосконалення методології та методів оптимізації параметрів і режимів роботи комбінованих викопувальних робочих органів з врахуванням умов ґрунтового середовища та фізико-механічних і агробіологічних властивостей коренеплодів цикорію кореневого.

Викладення основного матеріалу. На основі проведеного аналізу було встановлено, що вирішальне значення з точки зору фізико-механічних властивостей ґрунту під час процесу викопування коренеплодів цикорію має його твердість і вологість, а також зв'язок коренеплодів з ґрунтовым середовищем. Цей зв'язок характеризується силами, які необхідно прикласти для його руйнування і які залежать від погодних умов, способу обробки ґрунту, форми робочих органів, розмірно-масових параметрів коренеплодів тощо.

Під час проведення досліджень коренеплодів цикорію на міцність, або визначення величини зусилля на розтягування коренеплодів у вертикальній площині було встановлено, що допустиме навантаження коренеплодів цикорію на розрив знаходиться в межах від 55 до 84 Н/см² [6] Це свідчить про те, що без попереднього підкопування і інтенсивного руйнування зв'язків коренеплодів з ґрунтовым середовищем їх задовільне викопування з ґрунту практично неможливе, а в процесі викопування не повинно допускатися виникнення згинальних зусиль, які призводять до розламування тіла коренеплоду. Допустиме зусилля на згин коренів цикорію в середньому становить 3...9 Н [9], що характеризує корені цикорію, як одні з самих крихких коренеплодів.

З цією метою встановимо теоретичну залежність вказаної витяжної сили для двох основних випадків: перший – без попереднього підкопування коренів (невібраційні робочі органи) і другий – для вібраційних робочих органів (з попереднім руйнуванням зв'язку кореня з ґрунтом).

Для проведення теоретичних досліджень формалізується (моделюються) форма коренеплодів цикорію, щільність і вологість ґрунту, а також взаємодія між коренеплодом і

грунтовим середовищем.

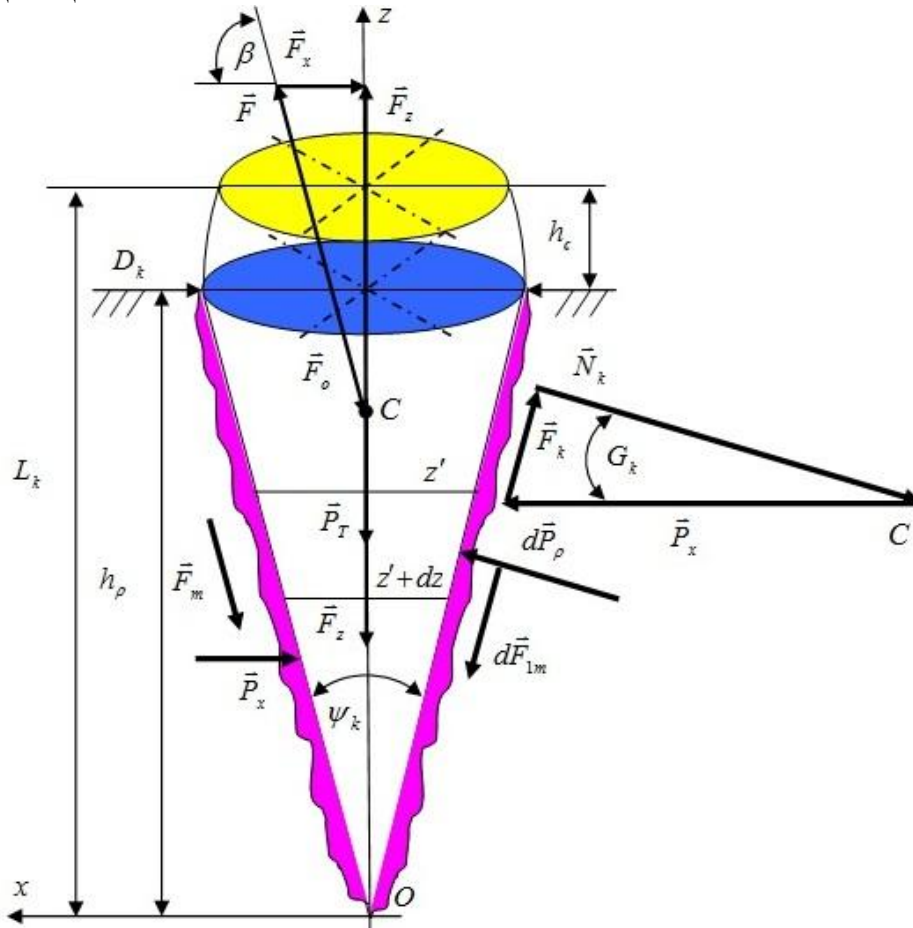


Рис. 1. Схема для розрахунку сили викопування конічних гладких коренеплідів

Схему для розрахунку сили викопування коренеплідів цикорію в загальному випадку наведено на рис. 1.

Віднесемо тіло коренеплоду з налиплим на його поверхні ґрунтом до системи координат xOz та позначимо всі вектори сил, які діють на нього в процесі викопування або витягування:

- \vec{F} – вектор сили викопування (витягування) коренеплоду з ґрунтового середовища;
- \vec{F}_o – вектор сили опору витягування коренеплоду з ґрунтового середовища;

– вектор сили опору \vec{F}_o витягування коренеплоду з ґрунтового середовища розкладемо на вектор сили опору \vec{F}_z вертикального переміщення коренеплоду та вектор сили опору \vec{F}_x горизонтального переміщенню коренеплоду.

Тому що викопування коренеплоду відбувається за поступального руху комбінованого копача в напрямку осі Ox , тоді вектор сили викопування \vec{F} буде направлений протилежно вектору сили опору \vec{F}_o та відхилений від вертикалі (осі Oz) на відповідний кут, який позначимо буквеним виразом β .

Відомо [9], що витягування коренеплоду з ґрунтового середовища в загальному випадку описується залежністю

$$F \geq \frac{F_z}{\cos \beta} + \frac{m_k \left(g + \frac{d^2 z_k}{dt^2} \right)}{\cos \psi_k}, \quad (1)$$

де F – сила викопування коренеплоду з ґрунтового середовища, Н; F_z – сила опору вертикального переміщення коренеплоду, Н; β – кут відхилення вертикальної осі коренеплоду у

вертикальній площині, град.; m_k – маса чистого коренеплоду, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; z_k – переміщення коренеплоду відносно осі Oz , м; d^2z_k/dt^2 – прискорення коренеплоду відносно осі Oz , м/с²; ψ_k – кут конуса росту коренеплоду, град.

Умова викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без пошкодження згідно з [7] записана наступним чином

$$F \leq \frac{[F_x]}{\sin \beta} + \frac{m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2}}{\beta}, \quad (2)$$

де F_z – сила опору горизонтальному переміщенню коренеплоду, Н; x_k – переміщення коренеплоду відносно осі Ox , м; d^2x_k/dt^2 – прискорення коренеплоду відносно осі Ox , м/с².

Проте у других доданках $\frac{m_k \left(g + \frac{d^2 z}{dt^2} \right)}{\cos \psi_k}$ нерівності (1) і $\frac{m_k \frac{d^2 x}{dt^2}}{\sin \psi_k}$ нерівності (2) враховано

безпосередньо тільки масу чистого коренеплоду m_k . Але під час витягування коренеплоду разом з його чистою масою підіймається також і шар налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду. Тобто в нерівності (1) і (2) не враховано масу налиплого ґрунту m_ρ на поверхні тіла коренеплоду цикорію, які мають доволі значні довжини L_k , по яких розподіляється додаткова маса m_ρ , що буде вносити суттєві корективи в значення сили опору F_o витягування коренеплоду з ґрунтового середовища, або на значення вектора сили опору вертикального \vec{F}_z та горизонтального \vec{F}_x переміщення коренеплоду.

Нехай сумарна сила ваги P_k тіла коренеплоду прикладена у точці C , або в центрі ваги тіла коренеплоду. При цьому сила опору F_o витягування коренеплоду з ґрунтового середовища безпосередньо та напряму залежить від сумарної сили ваги P_T тіла коренеплоду та сили тертя тіла коренеплоду по поверхні ґрунту F_m .

Сумарна сила ваги P_T тіла коренеплоду буде складатися з сили ваги чистого коренеплоду P_k та сили ваги P_ρ налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, тобто

$$P_T = P_k + P_\rho; \quad m_T = m_k + m_\rho; \quad P_k = m_T g = (m_k + m_\rho) g, \quad (3)$$

де P_T , P_k , P_ρ – відповідно, сумарна сила ваги тіла коренеплоду, чистого коренеплоду, налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду; Н; m_T , m_ρ – відповідно сумарна маса тіла коренеплоду, маса налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, кг;

$$F_m = f_m N_k, \quad (3)$$

f_m – коефіцієнт тертя; N_k – нормальна реакція коренеплоду, Н.

Якщо зробити припущення, що вектор сили викопування \vec{F} , який направлений протилежно вектору сили опору \vec{F}_o та відхилений від вертикалі (осі Oz) на кут $\psi/2$, тоді нерівність (1) можна записати у наступному вигляді

$$F \geq \frac{F_z + (m_k + m_\rho) \left(g + \frac{dV_{zk}}{dt} \right)}{\cos(\psi_k / 2)}, \quad (4)$$

де V_{zk} – швидкість руху коренеплоду відносно осі Oz , м/с.

Умову викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без його пошкодження можна записати наступним чином

$$F \leq \frac{[F_x] + (m_k + m_\rho) \frac{dV_{xk}}{dt}}{\sin(\psi_k / 2)}, \quad (5)$$

де V_{xk} – швидкість руху коренеплоду відносно осі Ox , м/с.

Для проведення подальшого аналізу запишемо, що:

- у загальному випадку маса коренеплоду m_k та налиплого ґрунту m_n на поверхні просторових форм коренеплодів визначаються за залежностями [10]

$$\left. \begin{aligned} m_k &= \rho_k V_k = \pi \int_a^b \rho_k(z) [f(z)]^2 dz; \\ m_\rho &= \rho V_\rho = \rho S_\rho \delta_\rho = 2\pi \int_a^b \rho(z) \delta_\rho(z) f(z) \sqrt{1 + [f'(z)]^2} dz \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де V_k, V_ρ – об'єм тіла коренеплоду та об'єм налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, м³; ρ_k, ρ – питома маса тіла коренеплоду та ґрунту, кг/м³; δ_ρ – товщина шару налиплого ґрунту, м; S_ρ – площа поверхні налиплого ґрунту, м².

При цьому згідно з [11] для наведеної просторової форми коренеплоду (рис. 1) маємо

$$m_k = \frac{\pi \rho_k}{3} [h_c (0,75 D_k^2 - h_c^2) + 0,25 D_k^2 (L_k - h_c)]; \quad (7)$$

$$m_n = \frac{\pi \rho h_\rho \delta_\rho}{3} (D_k + \delta_\rho), \quad (8)$$

де D_k – діаметр коренеплоду, м; L_k – довжина тіла коренеплоду, м; h_c – висота головки коренеплоду, м; h_ρ – висота налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, м.

Сила тертя тіла по поверхні ґрунту F_m визначається наступним чином:

$$F_z = 2(F_k - F_m) \cos(\psi_k / 2); \quad F_k = P_x \sin(\psi_k / 2); \quad F_m = f_m P_x \cos(\psi_k / 2), \quad (9)$$

де P_x – горизонтальна сила, яка виникає під час переміщення комбінованого копача, Н.

Тоді сила опору вертикального F_z переміщення коренеплоду згідно з залежностями (9) буде визначатися за формулою

$$F_z = 2[P_x \sin(\psi_k / 2) - f_m P_x \cos(\psi_k / 2)] \cos(\psi_k / 2). \quad (10)$$

З залежності (10) визначаємо коефіцієнт тертя f_m тіла коренеплоду по поверхні ґрунту, при цьому

$$f_m = \frac{\left[2P_x \operatorname{tg}(\psi_k / 2) - \frac{F_z}{\cos^2(\psi_k / 2)} \right]}{2P_x}. \quad (11)$$

Тоді сила тертя тіла коренеплоду по поверхні ґрунту F_m з врахуванням (9), (10) визначається за формулою

$$F_m = P_x \sin(\psi_k / 2) - \frac{2F_z}{\cos(\psi_k / 2)}. \quad (12)$$

Підставимо у залежності (4) і (5) наступні складові:

- значення сила опору F_z вертикального переміщення коренеплоду $F_z = 2P_x \cos^2(\psi_k / 2) [\operatorname{tg}(\psi_k / 2) - f_m]$, яке визначено з рівняння (10);

- значення маси m_k чистого коренеплоду, яке визначено з рівняння (7) та значення маси m_ρ налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, яке визначено з рівняння (8).

Після відповідних спрощень і перетворень отримаємо:

- загальну умову викопування коренеплодів цикорію з ґрунтового середовища

$$F \geq 2P_k \cos(\psi_k / 2) [\operatorname{tg}(\psi_k / 2) - f_m] + \frac{\pi}{3 \cos(\psi_k / 2)} (\rho_k [h_c (0,75 D_k^2 - h_c^2) + 0,25 D_k^2 (L_k - h_c)] + (0,5 D_k + \delta) \rho h_\rho \delta_\rho) \left(g + \frac{dV_{zk}}{dt} \right); \quad (13)$$

- умову викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без його пошкодження

$$F \leq \frac{1}{\sin(\psi_k / 2)} \left\{ [P_x] + \frac{\pi}{3} \left(\frac{dV_{xk}}{dt} \right) \left(\rho_k [h_c (0,75D_k^2 - h_c^2) + 0,25D_k^2 (L_k - h_c)] + \right) \right\}. \quad (14)$$

Таким чином, отримані нерівності (13) і (14) в загальному випадку є аналітичними умовами які характеризують зміну загального зусилля, яке необхідно прикласти до коренеплодів для їх викопування та зміну максимально можливого зусилля, яке необхідно прикласти до коренеплоду для його викопування без пошкодження, або без зламу хвостової частини тіла коренеплоду цикорію.

За початкових умов $\rho_k = 550 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, $L_k = 0,15 \text{ м}$, $h_c = 0,03 \text{ м}$, $\delta_\rho = 0,005 \text{ м}$, $\psi_k = \pi / 6 \text{ град.}$, $[P_x] = 10 \text{ Н}$ в загальному випадку побудовано залежності зміни сили викопування коренеплодів цикорію з умови їх непошкодження:

- від діаметра коренеплоду і кута конуса росту коренеплоду у вигляді функціонала $F = f_2(D_k, \psi_k)$, рис. 2а;

- від діаметра коренеплоду і висоти шару налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду у вигляді функціонала $F = f_1(D_k, h_\rho)$, рис. 2б.

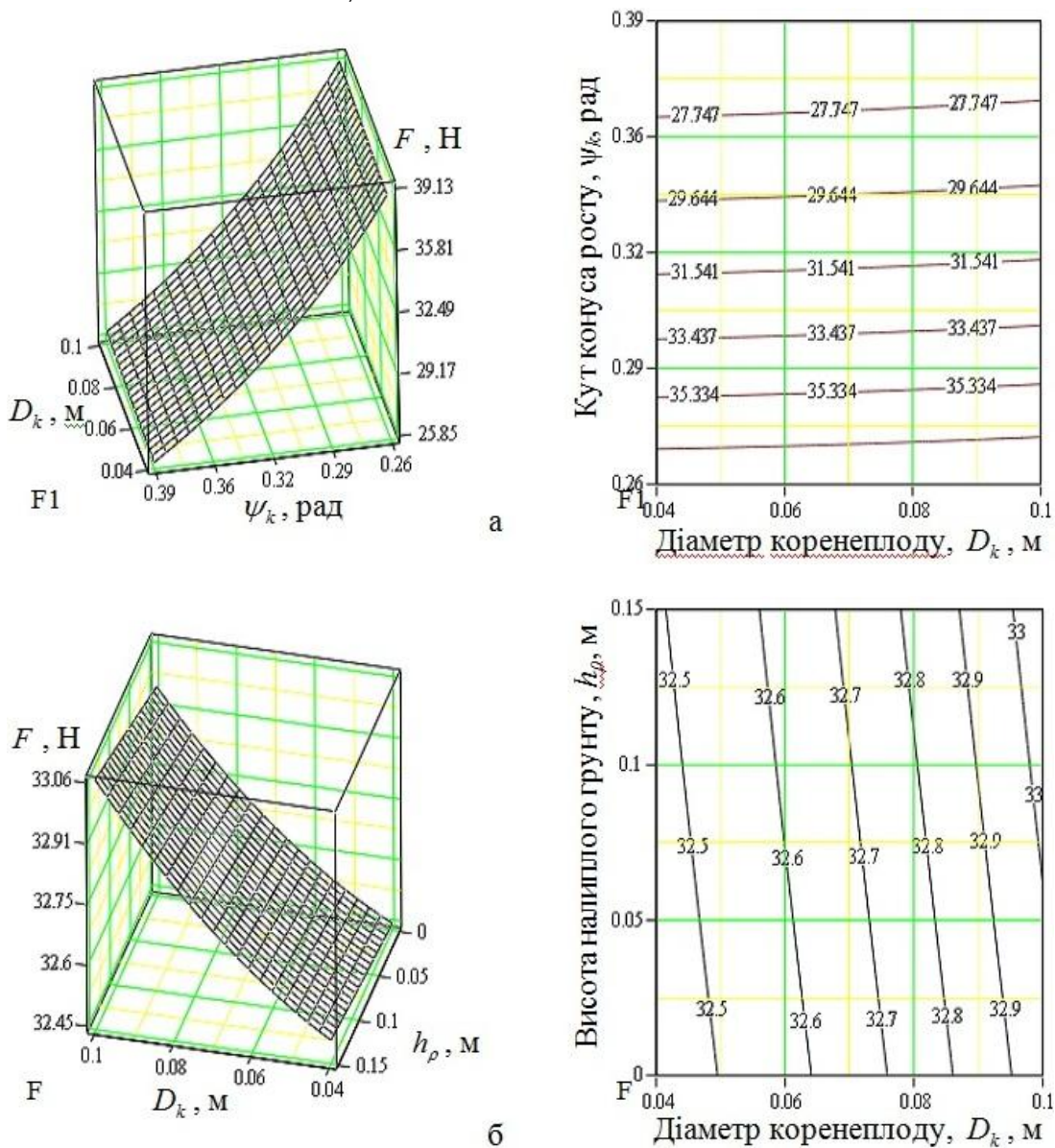


Рис. 2. Залежність зміни сили викопування коренеплодів з умови непошкодження:

а – $F = f_1(D_k; h_\rho)$; б – $F = f_2(D_k; \psi_k)$

Аналіз графічних побудов (рис. 2) показує, що зміна сили викопування коренеплодів цикорію залежно від діаметра коренеплодів D_k , висоти шару налиплого ґрунту h_p та кута конуса росту коренеплоду ψ_k має прямо пропорційний характер – зі збільшенням D_k , h_p і ψ_k сила викопування F коренеплодів цикорію з умови їх непошкодження збільшується та знаходиться у межах 25...39 Н, рис. 2а.

За усередненого значення кута конуса росту коренеплодів цикорію $\psi_k = 30...35$ град. сила викопування F коренеплодів з умови їх непошкодження коливається у незначних межах і становить приблизно 32,5...33,0 Н, рис. 2б.

Висновки. Отримані залежності (13) і (14) є теоретичними моделями, які дозволяють на етапі проектування визначити необхідні зусилля для викопування коренеплодів в загальному контексті та максимально допустимі зусилля викопування крихких коренеплодів цикорію за умови їх непошкодження, або за умови мінімізації їх пошкодження.

Список використаних джерел:

1. Яценко О.Я. Цикорій коренеплідний: Біологія, селекція, виробництво і переробка коренеплодів: Навчальний посібник. – Умань: ФІЦБ УААН, 2003. – 161 с.
2. Стельмах В.М. Вивчення основних розмірних параметрів і фізико-механічних характеристик цикорію кореневого / В.М. Стельмах // Науково-технічний бюлетень Хмельницької держ. с.-г. дослідної станції. – К., 1996. – № 4. – С. 72 – 80.
3. Дубровин В. Идентификация процесса разработки адаптированной корнеуборочной машины / Валерий Дубровин, Геннадий Голуб, Виктор Барановский, Виктор Теслюк // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – Lublin-Rzeszow, 2013. – Vol. 15. – № 3. – С. 243–255.
4. Погорілий М. Л. Механічні характеристики ґрунтово-коренеплідного середовища цукрових буряків в умовах динамічного навантаження / М. Л. Погорілий // Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград : КНТУ, 1995. – С. 150–158.
5. Гументик М.Я. Особливості цикорію кореневого і агротехніка його вирощування / М.Я. Гументик // Зб. наук. праць ПЦБ УААН. – К., 2003. – С. 339–341.
6. Борисюк В.О. Методика визначення глибини ходу викопувальних робочих органів для збирання цикорію / В.О. Борисюк, М.М. Зуев, М.Я. Гументик // Цукрові буряки. – 2003. – № 4. – С. 14.
7. Романишин О.Ю. Стан та перспективи органічного виробництва цикорію / О.Ю. Ромашин // Органік, 2016. – С. 78–84. http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/5186/1/Organik_2016_78-84.pdf.
8. Скальський А.Ю. Агробиологические и физико-механические характеристики цикория корневого / А.Ю. Скальський, Н.В. Потапенко, В.Н. Барановский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. – РУП Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2016. – Вып. 50. – Т. 1. – С. 158–162.
9. Андреев А.О. Розрахунки витяжної сили агрегатів для збирання коренеплодів цикорію / А.О. Андреев, В.М. Стельмах // Наук.-техн. бюлетень. – К. 1996. – № 4. – С. 56–59.
10. Бронштейн И.Н., Семедяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семедяев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 706 с.
11. Барановський В.М. Основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, М.Р. Паньків, В.В. Теслюк, В.Б. Онищенко. – Тернопіль : ТНТУ, 2014. – 351 с.

Рецензенти:

Пилипець Михайло Ількович, доктор технічних наук, професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

Головач Іван Володимирович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017