

УДК 631.356

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.43-59>

**В.М. Булгаков**, проф., д-р техн. наук, **З.В. Ружи́ло**, доц., канд. техн. наук  
*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна*  
*e-mail: vbulgakov@meta.ua*

**М.І. Черновол**, проф., д-р техн. наук, **М.О. Свірень**, проф., д-р техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: rektor@kntu.kr.ua*

## Теоретичне дослідження взаємодії бульби із спіраллю очисника картопляного вороху

Очищення викопаної з ґрунту картоплі від ґрунтових домішок і рослинних решток є найбільш важливим елементом в її виробництві, оскільки чистота бульб, відсутність пошкоджень і високі експлуатаційні показники самого прибирання в значній мірі визначають ефективність всієї галузі. Створення нових очисників картопляного вороху, менш металомістких, більш ефективних і високопродуктивних дозволяє успішно вирішувати це завдання. Для обґрунтування оптимальних кінематичних і конструктивних параметрів нового очищувача картопляного вороху спірального типу побудована математична модель руху одиначної бульби по очисній поверхні, утвореній двома спіралями. В результаті рішення на ПК отриманих аналітичних виразів були побудовані графічні залежності між параметрами розглянутого процесу руху одиначного тіла бульби картоплі між двома сусідніми спіралями, що дозволили вибрати оптимальні конструктивні і кінематичні параметри спірального сепаратора.

**картопля, прибирання, очищення від домішок, рух, математична модель, розрахунки на ПК**

**В.М. Булгаков**, проф., д-р техн. наук, **З.В. Ружи́ло**, доц., канд. техн. наук  
*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина*

**М.И. Черновол**, проф., д-р техн. наук, **Н.А. Свирень**, проф., д-р техн. наук  
*Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина*

## Теоретическое исследование взаимодействия клубня со спиралью очистителя картофельного вороха

Очистка выкопанного из почвы картофеля от почвенных включений и растительных остатков является наиболее важным элементом в ее производстве, поскольку чистота клубней, отсутствие поврежденных и высокие эксплуатационные показатели самого процесса уборки в значительной степени определяют эффективность всей отрасли. Создание новых очистителей картофельного вороха, менее металлоемких, более эффективных и высокопроизводительных позволяет успешно решать эту задачу. Для обоснования оптимальных кинематических и конструктивных параметров нового очистителя картофельного вороха спирального типа построена математическая модель движения единичных клубней по очистной поверхности, образованной двумя спиралями. В результате решения на ПК полученных аналитических выражений были построены графические зависимости между параметрами рассматриваемого процесса движения единичного тела клубней картофеля между двумя соседними спиралями, которые позволили выбрать оптимальные конструктивные и кинематические параметры спирального сепаратора.

**картофель, уборка, очистка от примесей, движение, математическая модель, расчеты на ПК**

**Постановка проблеми.** Промислове виробництво картоплі є однією з енерго- та матеріаломістких галузей сільського господарства, оскільки тільки з енергетичних витрат перевищує питомі витрати енергії на виробництво одиниці зернових культур в 4...5 разів. Найбільш вузькою ланкою в механізованих технологіях виробництва картоплі залишається її збирання, зокрема доведення одержуваної продукції до

кондиційного вигляду. Тому при подальшій розробці та удосконаленні робочих органів картоплезбиральних машин і оптимізації їх параметрів необхідно, перш за все, забезпечити не тільки зменшення їх матеріало- та енергоємність, а й істотно підвищувати якість викопаних бульб картоплі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз технологічних і конструктивних схем картоплезбиральної техніки, яка широко застосовується в даний час в світі, показує, що найбільша частка маси всіх машин припадає саме на сепаруючі робочі органи, так як вважається, що із збільшенням їх кількості і різноманітності, а відповідно і тривалості сепарації викопаного з ґрунту картопляного вороху, досягається необхідне підвищення чистоти отриманої продукції. Це пояснюється тим, що очисні робочі органи є ключовою ланкою в забезпеченні якісних показників роботи картоплезбиральної машини в цілому.

Проведеними теоретичними і експериментальними дослідженнями, а також численними випробуваннями різних типів картоплезбиральних машин [1...14] встановлено, що високоякісне очищення бульб картоплі від ґрунтових і рослинних домішок можливе в разі, коли значна маса ґрунту та інших компонентів вороху (залишки гички, кореневища, міцні ґрунтові утворення, каміння та ін.) буде відразу ж відокремлена від бульб в процесі викопування картопляного шару або ж відразу після його підйому і значна маса купи не буде подаватися разом з бульбами в середину машини. Однак застосовані підйомні транспортери, пристрої для розпушування і дроблення викопаного шару, встановлені відразу після пасивних і активних підкопуючих робочих органів вібраційного типу, грохоти, грудкорозчавлювачі, що мають достатню транспортну здатність, мають порівняно низькі сепаруючі показники роботи. В результаті цього значна маса ґрунтових домішок і рослинних залишків все одно подається всередину машини і надходить на інші сепаруючі робочі органи.

При цьому очисні робочі органи більшості картоплезбиральних машин різного типу, такі як струшувачі, пруткові елеватори, грохоти, а також сепаратори барабанного і ротаційного типів передбачають в своїй більшості так зване «пасивне» сепарування домішок. Так, не дивлячись на те, що дані робочі органи можуть вібрувати, мати різні активатори (наприклад, лопатеві, шнекові та ін.), здійснювати інші види примусових рухів, відведення домішок тут не є примусовим. Незважаючи на те, що тілам коренебульбоплодів картоплі, як і супроводжуючим їх домішкам, створюються різні за напрямками і величинам очищаючі зусилля, однак в більшості випадків сучасні сепаратори домішок не створюють для них умови саме примусового захоплення і примусового відведення із зони сепарації, тому домішки, у відомих пристроях, не завжди здатні до ефективної сепарації, особливо в умовах вологого ґрунту, що інтенсивно заповнює сепаруючі зазори, наявності кореневищ і інших рослинних залишків (сухих чи зелених), що також перебивають зазначені зазори. Крім того, відомі сепаратори картопляного вороху мають обмежені просіюючі зазори, що обумовлює захоплення і травмування тіл бульб картоплі.

**Постановка завдання.** На підставі теоретичних досліджень нової конструкцій очисника картоплі від домішок спірального типу визначити його оптимальні кінематичні та конструктивні параметри.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження проведені з використанням основ моделювання, теоретичної механіки та математики, а також складання програм та проведення числових розрахунків за допомогою ПК.

Нами на рівні винаходу розроблена нова та високоефективна конструкція очисника картопляного вороху спірального типа [9], в якому переміщення бульб картоплі відбувається в руслі, утвореному двома спіральними елементами, виконаними

у вигляді спіральних циліндричних пружин. Конструктивна схема даного очисника представлена на рис. 1 (загальний вигляд зверху). На рис. 2 даний вигляд очисника картопляного вороху збоку (а), тобто вид А на рис. 1 та спереду (б), тобто вид Б на рис. 1.

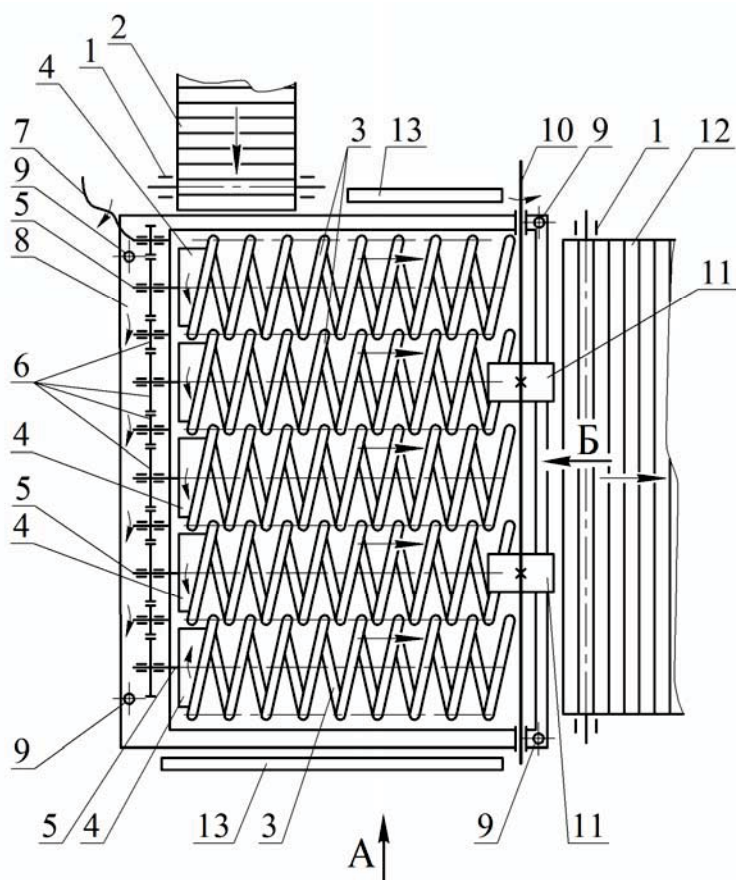


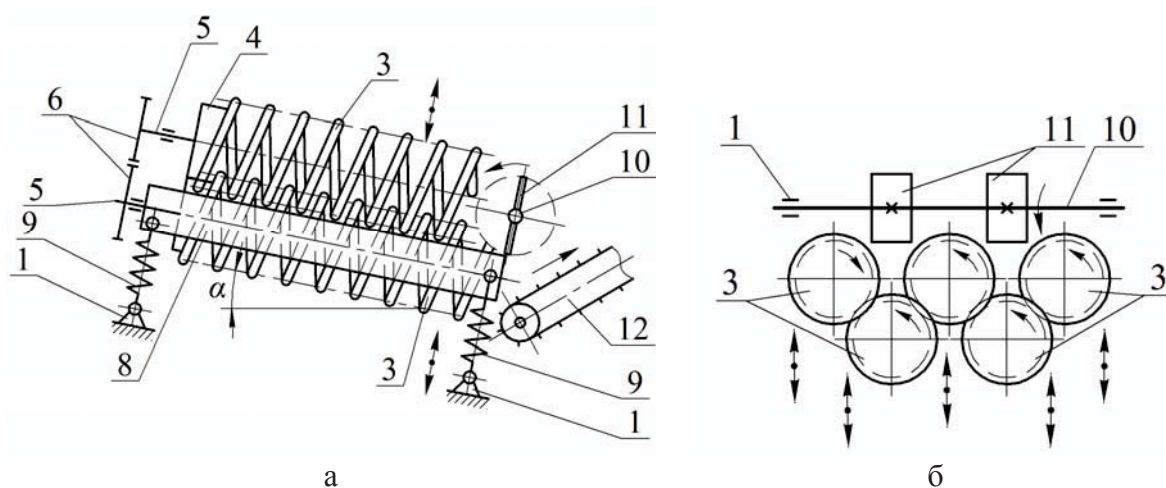
Рисунок 1 – Конструктивна схема спірального очисника картопляного вороху

Джерело: розроблено авторами з використанням [9]

Очисник картопляного вороху спірального типу містить основну раму 1, до якої підведений подавальний транспортер 2. Усередині рами 1 розташовані п'ять привідних очисних вальців, які виконані у вигляді консольних спіральних пружин 3, що встановлені зі взаємним перекриття і мають між собою сепаруючі зазори. Спіральні пружини 3, встановлені консольно одними кінцями на маточинах 4, зв'язаних з привідними валами 5, які обертаються в одному напрямі (виключення складає остання спіральна пружина 3, що обертається назустріч попередній), а другі їх кінці розташовані вільно. Обертальні рухи привідним валам 5 спіральних пружин 3 забезпечують зубчасті колеса 6, що обертаються завдяки загальному гнучкому привідному валу 7.

Як видно зі схеми (рис. 1) очисні вальці, які виконані у вигляді спіральних пружин 3, розташовані у повздовжньо-вертикальній площині хвилеподібно на різній висоті таким чином, що фактично утворюються два очисні русла. Гвинтові навівки усіх п'ятих спіральних пружин 3 спрямовані в одному напрямі до їх консольних кінців. Очисні вальці, що виконані у вигляді спіральних пружин 3, розміщені усередині рухомої рамки 8, що має прямокутну форму, яка встановлена зверху на основній рамі 1 за допомогою чотирьох пружин 9, розміщених у кутах рухомої рамки 8 і яка має нахил під кутом  $\alpha$  до горизонту. Над вихідними, вільно розташованими кінцями спіральних пружин 3, встановлений привідний вал 10, розміщений перпендикулярно повздовжнім

осям самих спіралей 3, з плоскими еластичними бітерами 11, що знаходяться усередині вказаних очисних русел. До другого кінця рухомої рамки 8 підведений вивантажувальний транспортер 12. Таким чином, привідний вал 10 є встановленим безпосередньо перед вивантажувальним транспортером 12. Для запобігання втрат бульб картоплі навколо очисних вальців, виконаних у вигляді спіральних пружин 3, закріплено плоскі прямокутні захисні екрани 13. Напрямки обертальних і коливальних рухів робочих органів очисника бульб картоплі від домішок, а також руху потоків картоплі показані стрілками.



а – вид А; б – вид Б

Рисунок 2 – Спіральний очисник картопляного вороху

Джерело: розроблено авторами з використанням [9]

Очисник картопляного вороху спірального типу працює таким чином. Картопляний ворох подається подавальним транспортером 2 на поверхню, утворену очисними вальцями, виконаними у вигляді спіральних пружин 3, які примусово обертаються в одному напрямку. При цьому ворох розосереджується по поверхні очисних вальців і спіральними пружинами 3 транспортується не тільки в радіальному, а й в осьовому напрямках. При цьому виділені з купи вороху бульби відразу потрапляють усередину двох очисних русел. А оскільки спіральні пружини 3 встановлено консольно, то коливання їх кінців сприяє ефективній сепарації дрібних ґрунтових домішок. Сепарування ґрунтових домішок й рослинних решток відбувається не тільки униз, але, завдяки хвилеподібному розташуванню привідних очисних вальців, що виконані у вигляді спіральних пружин 3, та їх примусовому обертальному русі, в різних, в тому числі, бічних напрямках. Це значно підвищує якість очищення бульб від домішок. При транспортуванні по очисній поверхні, бульби контактують з витками спіральних пружин 3 і тим самим ефективно очищуються від налиплого ґрунту. Оскільки спіральні пружини 3, встановлені одними кінцями на маточинах 4, закріплених на привідних валах 5, які обертаються в одному напрямку, а привід в обертальний рух валів 5 забезпечують привідні зубчасті колеса 6 і загальний гнучкий привідний вал 7, то процес транспортування та сепарування домішок може відбуватись при будь-якій (навіть високій) заданій швидкості обертання спіральних пружин 3. Завдяки тому, що очисні вальці, що виконані у вигляді спіральних пружин 3, розміщені усередині рухомої рамки 8, що має прямокутну форму і яка встановлена зверху на основній рамі 1 за допомогою

чотирьох пружин 9, розміщених у кутах рамки 8, вона має можливість здійснювати ще й окремі коливальні рухи, які здійснюються під дією змінного завантаження. Завдяки тому, що рухома рамка 8 має нахил під кутом  $\alpha$  до горизонту, то бульби, які у переважній більшості мають круглі форми, під дією сил тяжіння гарантовано рухаються з більшою швидкістю у напрямі вільних кінців спіральних пружин 3 усередині двох очисних русел, які утворені внаслідок того, що очисні вальці розташовані у повздовжньо-вертикальній площині хвилеподібно на різній висоті. Ґрунтові домішки та рослинні рештки, які не здатні до кочення, рухаються по очисній поверхні, утвореній очисними вальцями, більш повільно, однак внаслідок коливань вільних кінців спіральних пружин 3, а також самої рухомої рамки 8 на пружинах 9 відбувається їх інтенсивна сепарація униз, за межі очисника. Внаслідок цього до вихідних кінців спіральних пружин 3 ґрунтові домішки й рослинні рештки майже не доходять, а там опиняються у двох очисних руслах тільки бульби картоплі. Тут над вихідними, вільно розташованими кінцями спіральних пружин 3, встановлений привідний вал 10, який розміщений перпендикулярно повздовжнім осям самих спіралей 3, з плоскими еластичними бітерами 11, що знаходяться усередині вказаних очисних русел. А тому бітери 11 наносять по бульбах м'які удари, збиваючи з них налиплий ґрунт, і виштовхують на вивантажувальний транспортер 12. Завдяки тому, що привідний вал 10 є встановленим безпосередньо перед вивантажувальним транспортером 12, то всі домішки, які ще залишились, безпосередньо звільняють вільні кінці спіральних пружин 3 і падають донизу. Після повного очищення бульби потрапляють на вивантажувальний транспортер 12. Для запобігання втрат бульб картоплі в бічних напрямках застосовуються захисні екрани 13, які фактично оточують рухома рамка 8.

Осі елементів розміщено паралельно і міжцентрова віддаль між ними  $\alpha_w$  допускає перекриття витків спіралей.

Складемо еквівалентну схему взаємодії бульби картоплі з витками двох спіральних пружин (рис. 3).

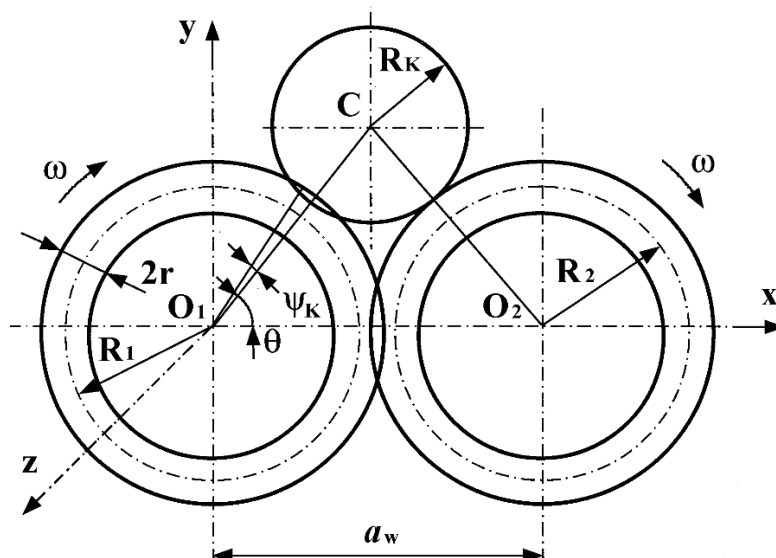


Рисунок 3 – Еквівалентна схема взаємодії бульби картоплі зі спіралями

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 приведена еквівалентна схема контакту бульби картоплі зі спіралями очисника.

Виберемо систему координат  $Oxyz$  так, щоб вісь  $Oz$  співпадала із віссю першої спіралі (пружини), а вісь  $Ox$  напрямлена в сторону другої спіралі і співпадала із лінією, що з'єднує осі спіралей в площині  $Oxy$ .

В загальному випадку лінія центрів і, відповідно, вісь  $Ox$ , нахилена під кутом  $\alpha$  до горизонту.

Осі витків спіральних елементів утворюють гвинтові лінії рівняння яких у параметричному вигляді:

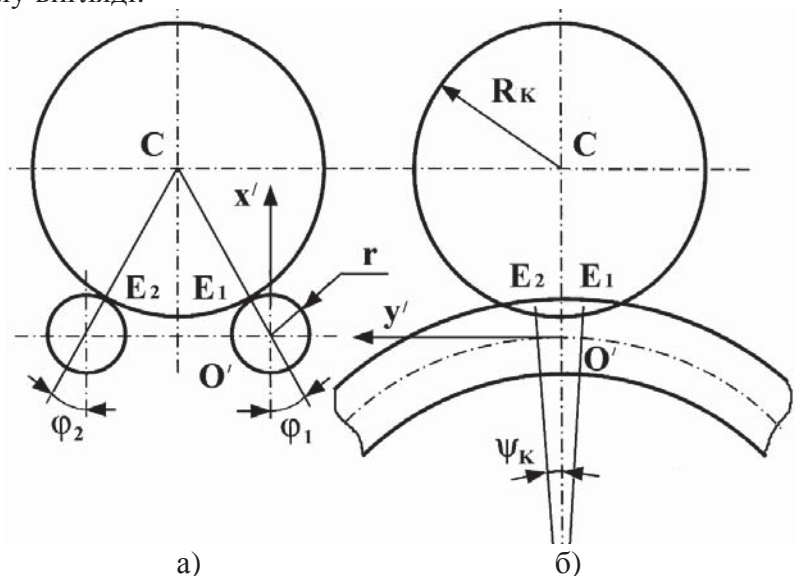


Рисунок 4 – Еквівалентна схема контакту бульби картоплі з поверхнею спіральних пружин  
Джерело: розроблено авторами

$$\begin{aligned}x_1 &= R_1 \cos(\psi_1 + \psi_{10}); \\y_1 &= R_1 \sin(\psi_1 + \psi_{10});\end{aligned}\quad (1)$$

$$z_1 = -\frac{S_1 \psi_1}{2\pi}.$$

$$\begin{aligned}x_2 &= R_2 \cos(\psi_2 + \psi_{20}) + a_w; \\y_2 &= R_2 \sin(\psi_2 + \psi_{20});\end{aligned}\quad (2)$$

$$z_2 = -\frac{S_2 \psi_2}{2\pi},$$

де  $R_1$  та  $R_2$  – радіуси відповідно першого та другого елементів, що задають розміщення осі прутка;

$S_1$  та  $S_2$  – кроки відповідно першої та другої спіралі;

$\psi_1$  та  $\psi_2$  – незалежні кутові параметри спіралей;

$\psi_{10}$  та  $\psi_{20}$  – початкові монтажні кути спіралей, що визначають напрямок розміщення січення витка в момент часу  $t = 0$ ;

$a_w$  – віддаль між осями спіралей.

Для правих спіралей значення кроку в спіралей приймається із знаком (+), для

лівих із знаком (-).

Формалізований опис поверхні спіральних елементів спрощується при використанні спеціальної гвинтової системи координат  $O\rho\varphi\psi$ , в якій розміщення довільної точки визначається параметрами  $\psi$ ,  $\varphi$  та  $\rho$ , де  $\psi$  – кутовий параметр, що задає розміщення поперечного січення по довжині спірального прутка;  $\rho$  та  $\varphi$  – відповідно радіальний та кутовий параметри полярної системи координат в площині поперечного січення.

Початкове розміщення осі  $O'\rho'$ , від якого визначається кут  $\psi$ , вибирають за напрямком вектора головної нормалі  $n$  гвинтової лінії.

Введемо додаткову систему координат  $O'x'y'z'$  так, щоб його ортами були орти супроводжуючого трикутника. Тоді вісь  $O'x'$  буде напрямлена по вектору головної нормалі  $\bar{n}$ , вісь  $O'y'$  – по напрямку дотичної  $\bar{t}$  до гвинтової осі прутка, а вісь  $O'z'$  – по вектору бінормалі  $\bar{b}$ . Координати довільної точки поперечного січення параметрами  $\psi$ ,  $\varphi$  та  $\rho$ , в системі  $O'x'y'z'$  визначаються за залежностями.

$$x' = \rho \cos \varphi; \quad y' = 0; \quad z' = \rho \sin \varphi. \quad (3)$$

Зв'язок системи координат  $O'x'y'z'$  із базовою системою  $Oxyz$  доцільно визначити, використовуючи матричні перетворення однорідних систем координат, в якій між векторами  $r$  та  $r'$  відповідних систем координат існує залежність:

$$r = R_z(\psi)T_zR_x(\gamma)T_xr', \quad (4)$$

де матриці кутових поворотів  $R_x$  і  $R_z$  та лінійних переміщень  $T_x$  та  $T_z$ .

В розвернутому вигляді взаємозв'язок, що описується залежністю (4) прийме вигляд:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\cos \gamma \sin \psi & \sin \gamma \sin \psi & R \cos \psi \\ \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \psi & R \sin \psi \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & \frac{\psi S}{2\pi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Згідно (5) зв'язок між координатами базової системи координат  $Oxyz$  та спеціальної гвинтової  $O\rho\varphi\psi$  буде:

$$\begin{aligned} x &= (R + \rho \cos \varphi) \cos \psi + \rho \sin \gamma \sin \varphi \sin \psi; \\ y &= (R + \rho \cos \varphi) \sin \psi - \rho \sin \gamma \sin \varphi \cos \psi; \end{aligned} \quad (6)$$

$$z = \frac{S\psi}{2\pi} + \rho \cos \gamma \sin \varphi.$$

Визначимо можливе розміщення картоплі на нерухомому спіральному сепараторі.

Прийmemo в першому наближенні, що картопля описується сферою. Тоді в точці контакту  $E_1$  і  $E_2$  нормалі до поверхні картоплі та поверхонь витків колениарні, а реакції із сторони витків проходять через центр картоплі (рис. 3-4). Отже координати  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$

центра картоплі радіусом  $R_k$  через параметри  $\chi\omega\rho$  можна представити як через параметри точки контакту  $E_1$ , так і через параметри точки контакту  $E_2$ . Виходячи із симетрії розміщення сферичної картоплі на витках, параметри точок контакту  $\omega_1$  та  $\omega_2$  сусідніх витків однієї спіралі зв'язані залежністю:

$$\omega_2 = -\omega_1. \quad (7)$$

Для сферичної картоплі радіальні параметри її центра  $C$ :

$$\rho_{1c} = \rho_{2c} = r + R_k. \quad (8)$$

Розглянемо варіант розташування коренеплоду, координати центра ваги якого будуть  $x_c = R_c$ ,  $y_c = 0$ ,  $z_c = s/2$ . Тоді, при початковому значенні кутового параметру витка спіралі  $\psi_0 = 0$ , кутові параметри точок контакту становитимуть  $\psi_1$  та  $\psi_2 = 2\pi - \psi_1$ , а кутовий параметр коренеплоду буде  $\theta_c = \psi_c = 0$ .

В цьому випадку із другого та третього рівнянь системи (5) маємо:

$$\rho_c \cos \gamma \sin \varphi = \frac{s}{2} - \frac{s\psi_k}{2\pi}; \quad (9)$$

$$\tan \psi_k = \frac{\rho_c \sin \gamma \cdot \sin \varphi}{R + \rho_c \cdot \cos \varphi}. \quad (10)$$

Виключення параметру  $\varphi$  приводить до трансцендентного рівняння зв'язку кутового параметру  $\psi$  з радіальним параметром  $\rho_c = R_k + r$ :

$$\tan \psi_k = \frac{\rho_c s (\pi - \psi_k) \sin \gamma}{2\pi \left( R + \rho_c \cdot \sqrt{1 - \frac{s^2 (\pi - \psi_k)^2}{4\pi^2 \rho_c^2}} \right)}. \quad (11)$$

Із рівняння (11) шукають числовими методами значення  $\psi = \psi(\rho_c) = \psi(R_c + r)$ , як функцію від радіусу картоплі.

Кут розміщення центра картоплі  $\theta_0$  визначається із умови контакту із витком іншої спіралі (рис. 1):

$$\cos \theta_0 = \frac{-a_\omega^2 - (R_c + R_u)^2 + (R_k + r_2 + R_2)^2}{a_\omega (R_c + R_u)}. \quad (12)$$

При відомій лінійній координаті  $z$  картоплі, її кутове розміщення визначається за залежністю:

$$\theta_0 = \frac{2\pi z}{S + \pi}. \quad (13)$$

Кутові параметри точок контакту рівні:

$$\theta_1 = \theta_0 - \psi_k, \quad (14)$$

$$\theta_2 = \theta_0 + \psi_k. \quad (15)$$



Тоді кутові параметри точок контакту та центру коренеплоду в полярній системі координат згідно (9):

$$\varphi_{1,2} = \pm \arcsin \frac{S(\pi - \psi_k)}{2\pi\rho_c \cos \gamma}. \quad (16)$$

Із першого і другого рівнянь системи (6), радіус розміщення картоплі при її обкочуванні по руслу, утвореному витками однієї спіралі (рис. 2):

$$R_c = X_c = \frac{(R_k + r) \sin \gamma \cdot S \psi_k}{2\pi(R_k + r) \cos \gamma \sin \psi_k} = \frac{Stg\gamma}{2\pi} \frac{\psi_k}{\sin \psi_k}. \quad (17)$$

Кочення картоплі радіусом  $R_k$  по витках першої спіралі можна представити як кочення сфери приведеним радіусом  $R_c$  по циліндричній поверхні приведеним радіусом  $R_\psi$ .

Тут:

$$R_c = R_k \frac{\cos \varphi}{\cos \psi}; \quad (18)$$

$$R_\psi = \frac{(R + r \cos \varphi)}{\cos \psi}. \quad (19)$$

Для спіралей із невеликим кутом піднімання  $\gamma$  витків та малим кроком  $S$  можна дати наближений розрахунок параметрів розміщення коренеплоду на витках.

Кут  $\psi_k$  шукаємо із наближеної залежності:

$$\sin \psi_k = \frac{\Delta l_k \cdot \cos \gamma}{R} = \frac{S \cdot \sin(2\gamma)}{4n}, \quad (20)$$

де  $\Delta l_k$  – довжина проекції дуги згідно рис. 2.

Кутовий параметр  $\varphi$  в першому наближенні буде:

$$\sin \varphi = \frac{S}{2(R_k + r)}. \quad (21)$$

На рис. 5 та рис. 6 приведені залежності кутів  $\psi_k$  та  $\varphi$  відповідно від радіуса спіральних елементів при  $s = 40$  мм та  $R_k = 40$  мм, розрахованими за наближеними залежностями (20) та (21) і за точними (11) та (16). Їх аналіз показує, що параметр  $\varphi$ , з достатньою для практичного використання точністю, визначається за спрощеною залежністю (21), тоді як параметр  $\psi_k$  для спіралей малого радіусу необхідно визначати тільки за залежністю (11).

Для випадку обертової спіралі вводимо проміжну систему координат  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$ , яка обертається відносно осі  $Oz = Oz_\omega$  нерухомої системи  $Oxyz$ . Тоді рівняння гвинтової лінії спіралі (1) та перетворення (3-6) будуть проводитись у системі  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$ , а її взаємозв'язок із системою  $Oxyz$  опишеться у вигляді перетворення:

$$r = R_z(\omega t) r_\omega = R_z(\omega t) R_z(\psi) T_z R_x(\gamma) T_x r'. \quad (22)$$

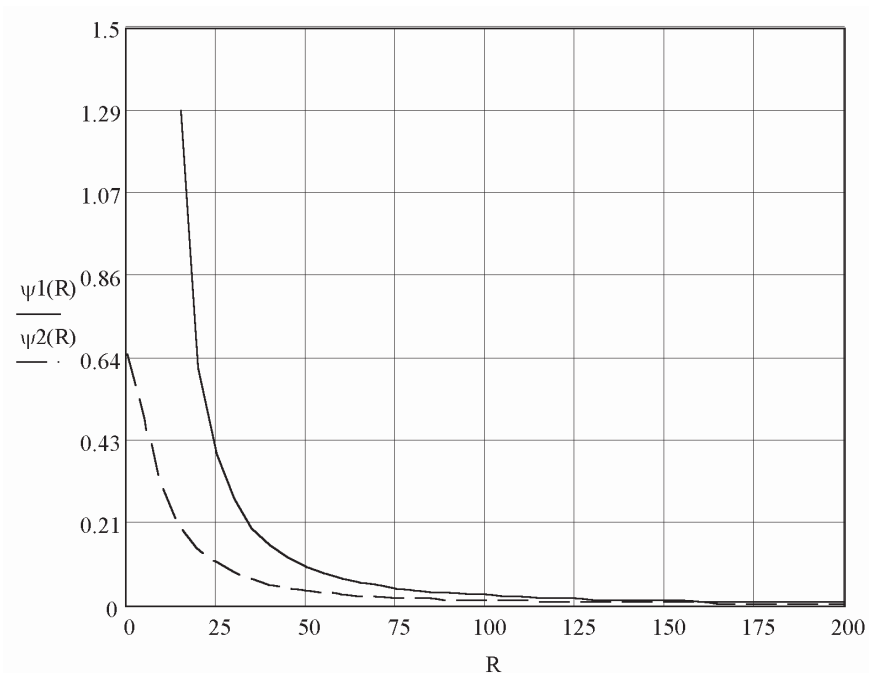


Рисунок 5 – Залежність кута  $\psi$  від радіуса спіральних елементів при кроці навивки  $S = 40$  мм та радіусі бульби  $R_K = 25$  мм

Джерело: розроблено авторами

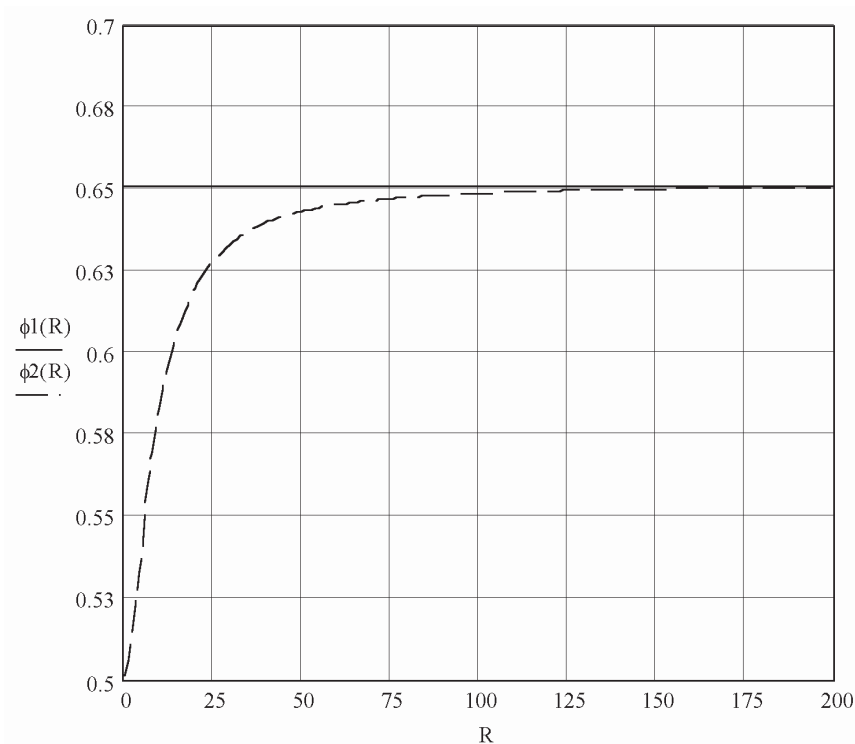


Рисунок 6 – Залежність кута  $\phi$  від радіуса спіральних елементів при кроці навивки  $S = 40$  мм та радіусі бульби  $R_K = 25$  мм

Джерело: розроблено авторами

Відповідно для обертової спіралі рівняння осі прутків буде (для першої):

$$\begin{aligned}x &= R_1 \cos(\psi_1 + \psi_{10} + \omega t); \\y &= R_1 \sin(\psi_1 + \psi_{10} + \omega t); \\z &= -\frac{S\psi_1}{2\pi}.\end{aligned}\quad (23)$$

Для другої спіралі обертання проводити відносно її осі і рівняння гвинтової осі прутків буде аналогічне.

Рівняння (6) зв'язку спеціальної системи координат із базовою буде:

$$\begin{aligned}x &= (R + \rho \cos \varphi) \cos(\psi + \omega t) + \rho \sin \gamma \sin \varphi \sin(\psi + \omega t); \\y &= (R + \rho \cos \varphi) \sin(\psi + \omega t) + \rho \sin \gamma \sin \varphi \cos(\psi + \omega t); \\z &= \frac{S\psi}{2\pi} + \rho \cos \gamma \sin(\psi + \omega t).\end{aligned}\quad (24)$$

Розміщення картоплі буде визначатись кутовим параметром  $\theta$ :

$$\theta = \psi + \omega t, \quad (25)$$

а її осьова координата:

$$z = \frac{(\theta - \omega t)S}{2\pi} + (R_k + r) \cos \gamma \cdot \sin \theta. \quad (26)$$

Відповідно осьова швидкість буде:

$$V_z = \frac{dz}{dt} = \left( \frac{d\theta}{dt} - \omega \right) \frac{S}{2\pi} + (R_k + r) \cos \gamma \cdot \cos \theta \frac{d\theta}{dt}. \quad (27)$$

Вертикальні та горизонтальні коливання в руслі:

$$V_y = \left[ -(R + \rho \cos \varphi) \sin \theta + \rho \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \right] \frac{d\theta}{dt}; \quad (28)$$

$$V_z = \left[ (R + \rho \cos \theta) \cos \theta + \rho \sin \gamma \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta \right] \frac{d\theta}{dt}; \quad (29)$$

При циліндричних пружинах, що обертаються відносно своєї осі, і при сферичній картоплі кут  $\theta$  буде незмінним.

При  $r = \text{const}$ ,  $S = \text{const}$  постійним буде і параметр  $\varphi = \text{const}$ .

Відповідно  $V_x = V_y = 0$  та  $V_z = -\frac{\omega \cdot S}{2\pi}$ .

У випадку еліпсної в січенні форми картоплі максимально і мінімально можливі віддалі від центра спіралей будуть:

$$\begin{aligned}l_{\max i} &= R_i + \delta + R_k, \\l_{\min} &= R_i + R_k - \delta,\end{aligned}\quad (30)$$

де  $\delta$  – величина відхилення осьових розмірів від середнього значення картоплі,  $R_k$ ;  $\delta = a - R_k = R_k - b$ . Тут  $a$  і  $b$  – півосі еліпсоїда.

Величина осцилюючого руху при перекочуванні картоплі буде проходити в напрямку осі  $Ox$  із амплітудою:

$$A = \frac{2k_A \delta (R_u + R_c)}{a_\omega}, \quad (31)$$

де  $k_A$  – коефіцієнт, що залежить від співвідношення радіусів спіралей і картоплі. Тоді в першому наближенні координата центра еліпсоїдної картоплі

$$x_e = \frac{a_w}{2} + A \sin \left( 2 \frac{R_c}{R_u} \omega t + \varepsilon \right), \quad (32)$$

а швидкість осцилюючого руху буде дорівнювати:

$$V_x = \frac{2AR_c}{R_u} \omega \cos \left( \frac{2R_c}{R_u} \omega t + \varepsilon \right), \quad (33)$$

де  $\varepsilon$  – зсув фаз частоти обертання спіралі і картоплі.

Розглянемо можливість інтенсифікації процесу сепарації вороху картоплі.

Змістимо осі обертання відносно осі спіралі на величину ексцентриситету  $\varepsilon$ .

Тоді зв'язок обертової системи координат  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$  відносно базової опишеться залежністю:

$$r = R_z^{(\omega t)} T_x^{(\varepsilon)} r_\omega = R_z(\omega t) T_x(\varepsilon) R_z(\psi) T_z R_z(\gamma) T_x r'. \quad (34)$$

Відповідно рівняння гвинтової осі прутків спіралі, що обертається буде:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t & 0 \\ \sin \omega t & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\omega + \varepsilon \\ y_\omega \\ z_\omega \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Звідки:

$$\begin{aligned} x &= (R \cos \psi + \varepsilon) \cos \omega t - R \sin \psi \sin \omega t; \\ y &= (R \cos \psi + \varepsilon) \sin \omega t + R \sin \psi \cos \omega t; \\ z &= z_\omega = \frac{S\psi}{2\pi}. \end{aligned} \quad (36)$$

Після відповідних перетворень система (36):

$$\begin{aligned} x &= R \cos(\psi + \omega t) + \varepsilon \cos \omega t; \\ y &= R \sin(\psi + \omega t) + \varepsilon \sin \omega t; \\ z &= \frac{S'\psi}{2\pi}. \end{aligned} \quad (37)$$

У випадку, якщо векторні величини ексцентриситету в двох спіралей однакові,  $\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon}_2$ , то кут розміщення картоплі в системі  $Ox_\omega y_\omega z_\omega$  буде постійним  $\theta = \text{const}$ .

Відповідно швидкості центра коренеплоду будуть:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= -\omega \varepsilon \sin \omega t; \\ \dot{y}_c &= \omega \varepsilon \cos \omega t; \\ \dot{z} &= -\frac{\omega S}{2\pi}. \end{aligned} \quad (38)$$

На рис. 7, 8, 9 та 10 представлені графіки зміни координат точок на поверхні спіралі  $x$  та  $y$  згодом при різних значеннях радіуса, ексцентриситету закріплення і кутової швидкості обертання спіралі, які отримані за допомогою чисельних розрахунків на ПК.

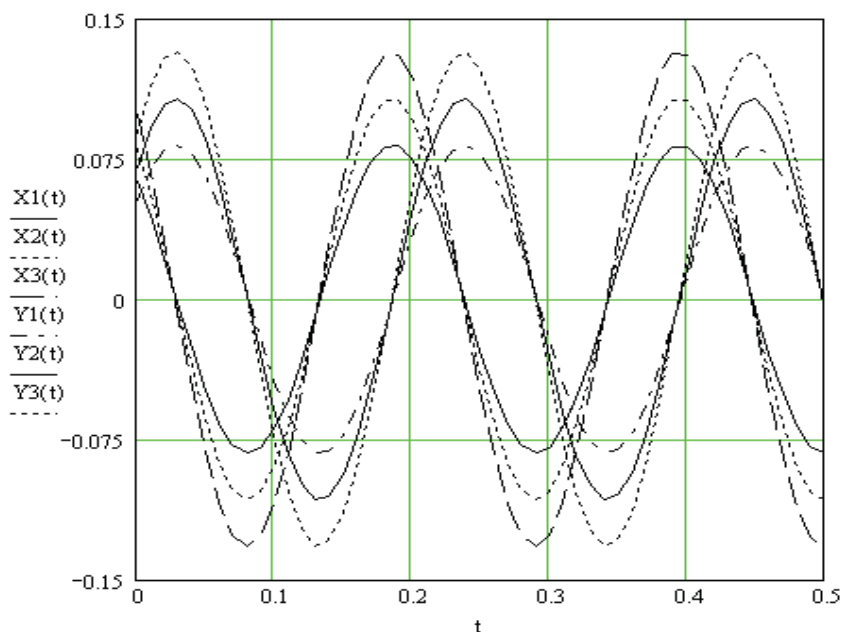


Рисунок 7 – Залежність змін координат  $x$  та  $y$  у часі точки, яка знаходиться на поверхні спірального сепаратора, при кутовій швидкості обертання спіралі  $30 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ , ексцентриситеті закріплення спіралі  $10 \text{ мм}$  і радіусі спіралі: 1)  $50 \text{ мм}$ ; 2)  $75 \text{ мм}$ ; 3)  $100 \text{ мм}$

Джерело: розроблено авторами

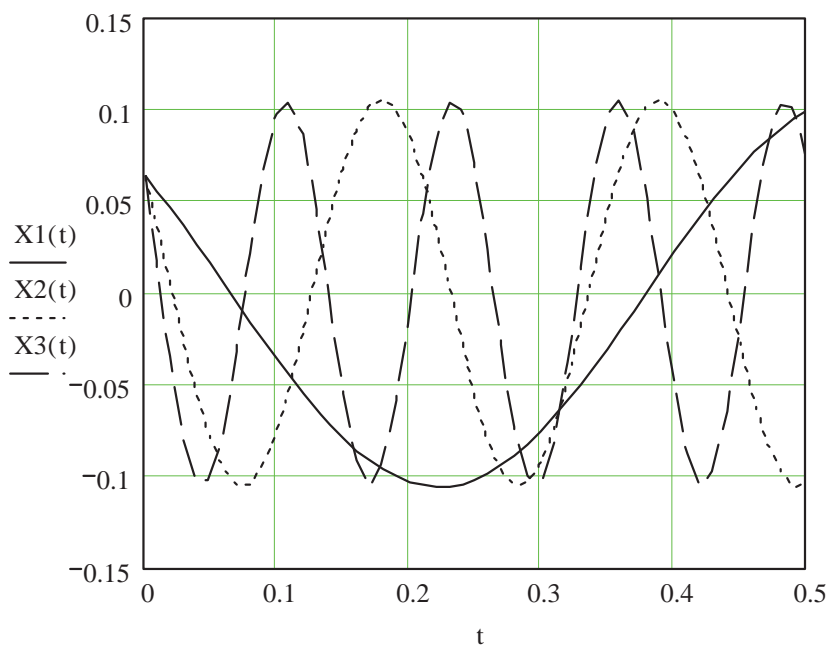


Рисунок 8 – Зміна поздовжньої координати  $x$  точки на поверхні спіралі з часом при радіусі спіралі  $75 \text{ мм}$ , ексцентриситеті  $10 \text{ мм}$  і кутовій швидкості обертання спіралей: 1)  $10 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ ; 2)  $30 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ ; 3)  $50 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$

Джерело: розроблено авторами

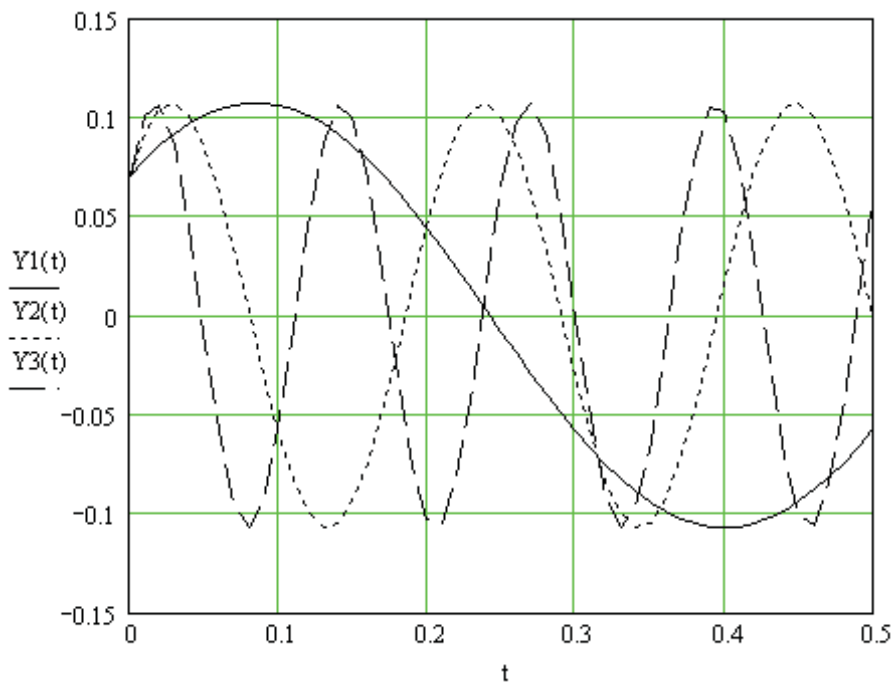


Рисунок 9 – Зміна поздовжньої координати  $y$  точки на поверхні спіралі з часом при радіусі спіралі 75 мм, ексцентриситеті 10 мм і кутовій швидкості обертання спіралей: 1) 10 рад·с<sup>-1</sup>; 2) 30 рад·с<sup>-1</sup>; 3) 50 рад·с<sup>-1</sup>

Джерело: розроблено авторами

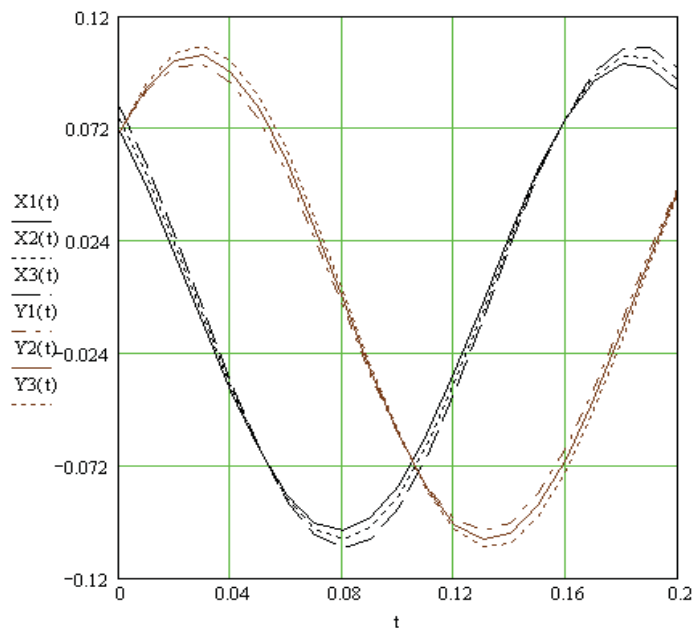


Рисунок 10 – Зміна координат  $x$  та  $y$  точки на поверхні спіралі з часом при радіусі спіралі 75 мм, кутовій швидкості обертання спіралі 10 рад·с<sup>-1</sup> і ексцентриситеті закріплення вальців: 1) 0 мм; 2) 5 мм; 3) 10 мм

Джерело: розроблено авторами

Отже, зміщення осі спіральних елементів сепараторів відносно осі їх обертання забезпечує поперечні коливання русла очисника, а тому може використовуватись для інтенсифікації очищення картоплі від домішок.

**Висновки:** 1. Розроблена нова конструкція очисника картоплі від домішок спірального типу, яка покращує якісні показники роботи картоплезбиральних машин, оскільки запобігає залипанню вологим ґрунтом елементів робочого органу (шляхом встановлення спіралей із взаємним перекриттям), а підвищення інтенсивності сепарації досягається ексцентричним встановленням спіралей.

2. Розроблено математичну модель взаємодії бульби з поверхнею спірального сепаратора при русі бульби в міжвитковому просторі навивки, яка визначає мінімальне значення кутової швидкості обертання вальців. При русі бульби діаметром 50 мм по поверхні спіралі радіусом 75 мм з прутком навивки діаметром 15 мм при закріпленні спіралей з ексцентриситетом 10 мм для забезпечення ефективного транспортування і очищення необхідно, щоб кутова швидкість обертання вальців була в межах 27...40 рад/с.

3. При аналізі кінематики руху бульби картоплі по поверхні очисника спірального типу за умови дотику бульби в двох точках до одної спіралі і в одній точці до іншої встановлено, що при збільшенні кутової швидкості обертання спіралей  $\omega$  зростає транспортуюча здатність робочого органу, а сепаруюча здатність при цьому дещо зменшується.

## Список літератури

1. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины . Москва: Машиностроение, 1984. 320 с.
2. Батяев Ф.И. Автоматическая сепарация примесей от клубней (к механизации уборки картофеля). *Картофель и овощи*, 1967. №6. С. 16-17.
3. Батяев Ф.И., Карев Е.Б., Петров Г.Д. Состояние и перспективы развития рабочих органов для отделения клубней картофеля от примесей при комбайновой уборке. Москва, 1972. 63 с.
4. Верещагин Н.И. Рабочие органы для возделывания, уборки и сортирования картофеля / Н.И. Верещагин, К.А. Пшеченков. Москва: Машиностроение, 1965. 241 с.
5. Масленников И.Н. Исследование и сравнительная оценка ротационных сепараторов картофелеуборочных машин: автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва, ВИСХОМ, 1974. 28 с.
6. Егошин А.В., Кропотов Е.И. К вопросу отделения клубней картофеля от примесей и гнилей . *Исследование машин и рабочих органов для возделывания и уборки картофеля, овощных и зерновых культур: Сб. научн. тр. Нижегородского СХИ*, Н. Новгород, 1991. С. 55-57.
7. Колчин Н.Н., Фурлетов В.М., Арсеньев Д.А. Состояние и перспективы развития отделителей примесей для послеуборочной обработки картофеля и овощей. Москва: ВИСХОМ, 1986. 65 с.
8. Karwowski T. Teoria i konstrukcia maszyn rolniczych. Warszawa: PWRiL. 1982. Т. 3. 429 s.
9. Очисник корнебульбоплодів від домішок: пат. України №120234, А 01 D 33/08. / Булгаков В.М., Головач І. В., Ружило З. В., Паскуці С., Санторо Ф., Аніфантіс А. С. Опубл. 25.10.2019 р., бюллетень №20.
10. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Ihnatiev Y. Investigation of the influence of the parameters of the experimental spiral potato heap separator on the quality of work. *Agronomy Research*. 2017. Vol. 15, No 1, pp. 44-54.
11. Bulgakov V., Nikolaenko S., Arak M., Holovach I., Ruzhylo Z., Olt J. Mathematical model of cleaning potatoes on surface of spiral separator. – *Agronomy Research*, 2018, Vol.16, No 4. pp. 1590-1606.
12. Митрофанов В.С. Физико-механические свойства картофеля. В кн. “Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин”. Том 5. Москва-Ленинград: Машгиз, 1940. С. 629-634.
13. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику. Киев: Сельхозобразование, 1996. 234 с.
14. Рогатинський Р.М. Механико-технологические основы взаимодействия шнековых рабочих органов с сырьем сельскохозяйственного производства: дис.... д-ра техн. наук / Нац. аграрн. ун-т. Киев, 1997. 480 с.

## References

1. Petrov, G.D. (1984). *Kartofeleuborochnye mashiny [Potato harvesting machines]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Batyaev, F.I. (1967). Avtomaticheskaya separaciya primesej ot klubnej (k mehanizacii uborki kartofelya) [Automatic separation of impurities from tubers (to the mechanization of harvesting potatoes)]. *Kartofel i ovoshi*, №6, 16-17 [in Russian].
3. Batyaev, F.I., Karev, E.B. & Petrov, G.D. (1972). *Sostoyanie i perspektivy razvitiya rabochih organov dlya otdeleniya klubnej kartofelya ot primesej pri kombajnovoj uborke [The state and development prospects of the working bodies for separating potato tubers from impurities during combine harvesting]*. Moscow [in Russian].
4. Vereshagin, N.I. & Pshechenkov, K.A. (1965). *Rabochie organy dlya vzdelyvaniya, uborki i sortirovaniya kartofelya [Working bodies for the cultivation, harvesting and sorting of potatoes]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Maslennikov, I.N. (1974). *Issledovanie i sravnitel'naya ocenka rotacionnyh separatorov kartofeleuborochnykh mashin [Research and comparative evaluation of rotary separators of potato harvesters]*. Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk. Moscow, VISHOM [in Russian].
6. Egoshin, A.V. & Kropotov, E.I. (1991). K voprosu otdeleniya klubnej kartofelya ot primesej i gnilej [On the issue of separating potato tubers from impurities and rot]. *Issledovanie mashin i rabochih organov dlya vzdelyvaniya i uborki kartofelya, ovoshnykh i zernovykh kultur: Sb. nauchn. tr. Nizhegorodskogo SHI*. N. Novgorod, S. 55-57 [in Russian].
7. Kolchin, N.N., Furletov, V.M. & Arsenev, D.A. (1986). *Sostoyanie i perspektivy razvitiya otdelitelej primesej dlya posleuborochnoj obrabotki kartofelya i ovoshej [State and development prospects of impurity separators for post-harvest processing of potatoes and vegetables]*. Moscow: VISHOM [in Russian].
8. Karwowski, T. (1982). *Teoria i konstrukcia maszyn rolniczych [Theory and design of agricultural machinery]*. Warszawa: PWRiL, Vol. 3 [in Polish].
9. Bulgakov, V.M., Golovach, I.V., Ruzhilo, Z.V., Paskuci Simone, Santoro Franchesko, Anifantis Aleksandros Sotirios (2019). Ukraine Patent No.120234 *Ochisnik kornebulboplodiv vid domishok [Purification of root tubers from impurities]* [in English].
10. Bulgakov, V., Ivanovs, S., Adamchuk, V. & Ihnatiev, Y. (2017). *Investigation of the influence of the parameters of the experimental spiral potato heap separator on the quality of work. - Agronomy Research, Vol. 15, No 1, 44-54* [in English].
11. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Arak, M., Holovach, I., Ruzhylo, Z. & Olt, J. (2018). *Mathematical model of cleaning potatoes on surface of spiral separator. – Agronomy Research, Vol.16, No 4, 1590-1606*.
12. Mitrofanov, V.S. (1940). *Fiziko-mehanicheskie svoystva kartofelya. V kn. «Teoriya, konstrukciya i proizvodstvo selskohozyajstvennykh mashin» [Physico-mechanical properties of potatoes. In the book «Theory, design and production of agricultural machines»]*. Moscow-Leningrad: Mashgiz, Vol.5, 629-634 [in Russian].
13. Vasilenko, P.M. (1996). *Vvedenie v zemledelcheskuyu mehaniku [Introduction to agricultural mechanics]*. Kiev: Selhozobrazovanie [in Russian].
14. Rogatinskij, R.M. (1997). *Mehaniko-tehnologicheskie osnovy vzaimodejstviya shnekovykh rabochih organov s syrem selskohozyajstvennogo proizvodstva [Mechanical-technological bases of interaction of auger working bodies with raw materials of agricultural production]*. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. Kiev: Nacionalnyj agrarnyj universitet [in Russian].

**Volodymyr Bulhakov**, Prof., DSc., **Zinovii Ruzhylo**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

**Mykhaylo Chernovol**, Prof., DSc., **Mykola Sviren**, Prof., DSc.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Theoretical Study of the Interaction of a Tuber with the Spiral of Potato Cleaner**

Cleaning of potatoes from soil and plant residues is the most important element in their production, as the purity of the tubers, the absence of damage and the high performance of the harvest itself largely determine the efficiency of the entire industry. The creation of new cleaners of potato residues that are less metal-intensive, efficient and high-performing allows solving this problem successfully.



A new design of the spiral-type residue cleaner has been developed. It improves the performance of potato harvesting machines preventing operating elements from sticking with wet soil (by installing spirals with mutual overlapping). The separation intensity is achieved by eccentric installation of spirals.

A mathematical model of the movement of a tuber along the cleaning surface formed by two spirals is developed in order to substantiate the optimal kinematics and design parameters of a new spiral-type potato cleaner. On the basis of computer-calculated analytical expressions, graphical dependences between the parameters of the considered process of movement of a tuber between two adjacent spirals were constructed. That allowed identifying the optimal design and kinematics parameters of the spiral separator. While analyzing the kinematics of movement of a tuber along the surface of the spiral-type cleaner under conditions of contact of the tuber at two points to one spiral and at one point to another, we established that as the angular velocity of the spiral rotation increases, the transporting capacity of the operating element also increases, and the separation capacity is somewhat reduced.

**potato, harvesting, cleaning from residues, movement, mathematical model, computer calculations**

*Одержано (Received) 29.11.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*

**УДК 631.33**

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.59-66>

**К.В. Васильковська**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: vasilkovskakv@ukr.net*

## Визначення раціональних параметрів пневмомеханічного висівного апарата з периферійним розташуванням комірок та інерційним видаленням зайвого насіння

В статті запропоновано нову конструкцію пневмомеханічного висівного апарата з периферійним розташуванням комірок на висівному диску та пасивним пристроєм, що дозволяє видаляти зайве насіння інерційним способом та забезпечити точний висів насіння просапних культур. Проведена серія досліджень запропонованого висівного апарата для насіння цукрових буряків дозволила визначити вплив розрідження у вакуумній камері висівного апарата та колової швидкості комірок на коефіцієнт заповнення комірок. Запропонована конструкція нового пневмомеханічного висівного апарата дозволяє значним чином знизити вакуум в системі, при цьому збільшується колова швидкість комірок висівного диска до значень поступальної швидкості посівного агрегату, що забезпечує сталу точку скидання насіння з висівного диска та однакові траєкторії їх польоту до борозни при якісному заповненні комірок. Для досягнення поставлених задач з визначення раціональних параметрів та режимів роботи висівного апарата використовувався метод планування багатофакторного експерименту. При цьому були визначені основні рівні та інтервали варіювання факторів для висіву насіння цукрових буряків при визначенні коефіцієнта заповнення комірок висівного диска. За допомогою пакету прикладних програм Statistica 6.0. для параметра оптимізації – коефіцієнта заповнення комірок побудовано поверхню відгуку та лінії рівного виходу.

**пневмомеханічний висівний апарат, висівний диск, експеримент, коефіцієнт заповнення комірок, розрідження, колова швидкість комірок**