



**МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ**  
**СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 633.63.631.35

**ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ  
ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ БУРЯКІВ ГНУЧКОЮ  
ОЧИСНОЮ ЛОПАТТЮ, ВСТАНОВЛЕНОЮ  
НА ПРИВІДНОМУ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВАЛУ**

Булгаков В.М.<sup>1</sup>, д.т.н., академік НААН,Ігнат'єв Є.І.<sup>2</sup>, інженер<sup>1</sup> *Національний університет біоресурсів і природокористування  
України*<sup>2</sup> *Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел./факс (0619) 42-12-65. E-mail: yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua

**Анотація** – найбільш поширеними у світі технологіями збирання гички цукрового буряку є суцільне зрізання усього масиву зеленої гички, її збирання для використання при виробництві біогазу і подальше дообрізання верхніх частин головок коренеплодів від залишків, яке здійснюється на корені. За такою схемою працює більшість гичкозбиральних машин, що випускається зараз у світі. Однак проведеними зараз дослідженнями встановлено, що при дообрізанні верхніх частин головок коренеплодів втрачається до 10% цукроносної маси. Крім цього виникає гостра потреба негайної переробки коренеплодів цукрового буряку, оскільки при обрізанні головок коренеплодів з часом відбувається втрати цукрового соку, а через зрізану частину усередину коренеплоду потрапляють бактерії, що викликають загнивання, і як правило повну втрату, усього коренеплоду. Тому більш сприятливою операцією при збиранні гички є не обрізання головок, а їх очищення від залишків гички. При цьому до операції очищення коренеплодів цукрового буряка від залишків гички пред'являються досить високі вимоги, обумовлені відсутністю наявності на головках коренеплодів зелених і сухих залишків, а також втрат і ушкоджень самих головок коренеплодів. Метою даного дослідження є розробка найбільш повної теорії взаємодії гнучкої очисної лопати з головою коренеплоду цукрового буряка на корені, у процесі її очищення, коли лопать встановлюється на горизонтальному приводному валу. Для дослідження використані методи моделювання,



вищої математики й теоретичної механіки, зокрема теореми про зміну кінетичної енергії механічної системи, теореми про зміну моменту кількості руху механічної системи, теорії удару, складання й рішення в замкнутому вигляді диференціальних рівнянь руху, а також складання програм і проведення чисельних розрахунків на ПК. В результаті проведеного дослідження була розроблена еквівалентна схема та складено нове диференціальне рівняння руху гнучкої очисної лопаті по поверхні головки коренеплоду цукрового буряка, яка встановлена на привідному горизонтальному валу. Виходячи з умов створення необхідної сили зчісування й не вибивання із ґрунту коренеплодів буряка, з урахуванням розмірних і масових характеристик коренеплодів цукрового буряка отримані нові кінцеві вирази для визначення кута повороту й кутової швидкості обертального руху гнучкої очисної лопаті при різному значенні її геометричних розмірів і форми: прямокутного паралелепіпеда й прямого кругового циліндра. Отримано також новий аналітичний вираз для визначення сили зчісування черешків гички зі сферичної поверхні головки коренеплоду цукрового буряка. На підставі проведеного чисельного моделювання на ПК визначені раціональні кінематичні й конструктивні параметри очисника головок коренеплодів цукрових буряків, що забезпечують високі показники якості очищення головок від залишків гички. До цих параметрів відносяться: швидкість поступального руху, яка повинна бути не менша, ніж  $2,5...3,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , довжина еластичної очисної лопаті повинна бути не меншою ніж  $0,4 \text{ м}$ , радіус барабана –  $0,25...0,3 \text{ м}$ , маса  $0,4 \text{ кг}$ , а сила зчісування  $90...110 \text{ Н}$ .

**Ключові слова:** буряк цукровий, гичка, очисна лопать, сила, удар, еквівалентна схема, диференціальні рівняння, конструктивні параметри.

*Постановка проблеми.* Використання сучасної технології збирання гички цукрового буряку передбачає, що після основної суцільної обрізки гички цукрового буряка, як правило роторними гичкорізалями апаратами, на корені на головках коренеплодів залишаються залишки гички у вигляді зелених та міцних коротких черешків (стебел) або сухі та полегли окремі листи й стебла, що перебувають у міжряддях посівів. Це значно і неприпустимо забруднює коренеплоди цукрового буряку при їх наступному викопуванні з ґрунту [5]. Тому, з метою неприпустимості вмісту рослинних домішок у купі викопаних коренеплодів створені конструкції очисників головок на корені, з яких найбільше поширення отримали лопатеві очисники, із приводними горизонтальними валами. По своєму конструктивному виконанню такі



очисники можуть бути одновальними або двохвальними. Так, конструкція найбільш складного двохвального очисника містить послідовно розташовані два приводних очисних вали з встановленими на них еластичними очисними лопатями, які в процесі роботи рухаються поступально по рядках посівів на встановленій висоті паралельно поверхні ґрунту й розташовані під деяким кутом до рядків коренеплодів буряка і доочищують від залишків гички головки коренеплодів. На першому очисному валу, перпендикулярно його осі обертання, консольно жорстко закріплені гнучкі очисні лопаті із прогумованого ремня. На другому очисному валу використовуються очисні лопаті з гуми, які закріплені шарнірно й розташовуються в радіальному напрямі. Перший приводний вал обертається проти напрямку поступального руху очисника, а другий, навпаки – по ходу руху очисника. Гнучкі очисні лопаті першого вала, наносячи удари по головках коренеплодів цукрового буряка, збивають залишки гички з головок коренеплодів і, за рахунок розташування вала під деяким кутом до рядків посівів коренеплодів цукрового буряку, вимітають рослинні (а також дрібні ґрунтові) домішки з ділянки плантації підготовленої для викопування коренеплодів із ґрунту на прибрану ділянку бурякового поля. Очисні лопаті другого вала, обертаючись назустріч лопатям першого вала, остаточно очищують головки коренеплодів від не зрізаних залишків гички.

Як показали численні випробування, даний двовальний очисник має ряд істотних недоліків, серед яких основними є: підвищена енергоємність процесу, вибивання тіл коренеплодів буряка із ґрунту, що, надалі, призводить до їхніх втрат, має місце інтенсивне зношування еластичних очисних лопатей, що значно ускладнює експлуатацію очисника. Не у всіх випадках дані типи очисників головок коренеплодів цукрових буряків на корені забезпечують необхідну якість очищення. Так, в разі коли на сферичній поверхні головки коренеплоду залишаються незрізаними короткі, зелені й міцні залишки гички, еластичні лопаті, нажаль, не в змозі, шляхом однократного впливу, ефективно їх видаляти з головок коренеплодів. Також доволі часто стаються випадки, коли не вся сферична поверхня головки коренеплоду однаково якісно очищається від залишків гички, особливо та її частина, що розташовується позаду від напрямку поступального руху очисника. Тому технологічний процес очищення головок коренеплодів від залишків гички на корені еластичною очисною лопаттю, встановленою на приводному горизонтальному валу, вимагає свого подальшого вдосконалення, зокрема більш глибокого дослідження й обґрунтування оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів, що забезпечують високу ефективність їх застосування.



*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Актуальним в галузі механізації буряківництва питанням очищення (видалення залишків гички) з головок коренеплодів цукрового буряку після її основної обрізки на корені ріжучими апаратами гичкозбиральних машин і очисниками головок присвячена чисельна низка наукових праць [1-4, 6, 10, 15] та ін. У них викладені результати теоретичних і експериментальних досліджень очисників головок коренеплодів цукрового буряку різних конструкцій: лопатевих [1, 4, 6, 10], кільцевого, секторного, барабанного типів, а також очисника виконаного у вигляді параболоїда [2, 3, 7, 13]. Однак найбільше застосування у світі знайшли очисники головок коренеплодів лопатевого типу, через простоту їхніх конструкцій і достатньо високу якість роботи в порівняно сприятливих умовах (відсутність значної кількості залишків гички – коротких, зелених і сухих, полеглих, міцно розталованих на головках коренеплодів цукрового буряку) [14]. В чисельних опублікованих наукових працях представлені різні варіанти теоретичних досліджень взаємодії очисних елементів з головкою коренеплодів цукрового буряку. Однак у більшості з зазначених наукових робіт при теоретичному обґрунтуванні їх конструктивних і кінематичних параметрів недостатньо точно й повно враховані створювані очисниками зусилля зчісування, розмірні характеристики коренеплодів, напрямок і модуль робочої швидкості поступального руху. Також недостатньо, у деяких працях, обґрунтована маса еластичних очисних лопатей і т. ін. Незважаючи на те, що технологічні процеси збирання цукрового й кормового буряку багато в чому подібні, однак збирання гички і її залишків з головок коренеплодів кормового буряку на корені практично не досліджені, у деяких роботах частково обґрунтовані і тільки експериментально деякі їх параметри [9-11]. Варто також підкреслити, що наведені в науковій літературі відомості стосуються теоретичних і експериментальних досліджень тільки конкретних типів і конструкцій очисників головок коренеплодів від залишків гички з усіма прийнятими їхніми авторами допущеннями й спрощеннями, а тому їхнє застосування для подальших досліджень нових типів очисників є доволі складним. Основні положення уточненої теорії взаємодії гнучкої очисної лопаті з головкою коренеплоду, закріпленому у ґрунті наведені в роботі [12]. Однак тут не представлені результати чисельних розрахунків, які б показували вплив кінематичних й конструктивних параметрів гнучкої очисної лопаті на ефективність такої взаємодії, тобто на якість очищення головок коренеплодів цукрових буряків від залишків гички.

Таким чином, дотепер у літературі не знайшли відображення дослідження, які б містили найбільш загальні та повні, а тому універсальні теорії, які можливо застосовувати при чисельному моделюванні і які могли б лягти в основу подальших розрахунків і проектування



будь-якого типу очисників головок коренеплодів буряків на корені еластичною очисною лопаттю, що встановлена на приводному горизонтальному валу.

*Мета дослідження.* Розробити найбільш загальну теорію взаємодії еластичної очисної лопаті зголовкою коренеплоду цукрового буряка на корені, у процесі її очищення від залишків гички, коли лопать встановлюється на приводному горизонтальному валу і дати результати чисельного моделювання її кінематичних і конструктивних параметрів.

*Методи дослідження.* Аналітичне дослідження проведене з використанням методів моделювання, вищої математики й теоретичної механіки, зокрема теореми про зміну кінетичної енергії механічної системи, теореми про зміну моменту кількості руху, теорії удару, складання й рішення в замкнутому виді диференціальних рівнянь руху. Чисельні розрахунки отриманих нових аналітичних досліджень проведені з застосуванням методів складання програм та розрахунків на ПК.

*Результати дослідження та їх обговорення.* Для теоретичного обґрунтування оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів очисників головок коренеплодів від залишків гички з горизонтальними приводними валами побудуємо найбільш загальну математичну модель взаємодії гнучкої очисної лопаті очисника з головкою коренеплоду буряка, закріпленого в ґрунті.

Для цього, на початку, сформуємо еквівалентну схему роботи найпростішого лопатевого очисника головок коренеплодів буряка, тобто розглянемо тільки процес взаємодії одиничної, еластичної очисної лопаті зголовкою коренеплоду буряка, розташованого (закріпленого) у ґрунті, головка якого виступає на деяку висоту над рівнем поверхні ґрунту й містить на своїй утворюючій не зрізані залишки гички (черешки) (рис. 1). Зазначений процес взаємодії еластичної очисної лопаті й головки коренеплоду буряка будемо розглядати в повздовжньо-вертикальній площині. При цьому вісь горизонтального приводного вала (точка  $O$  на еквівалентній схемі) очисника перпендикулярна повздовжньо-вертикальній площині, лопать  $AM$  шарнірно підвішена на осі  $A$ , що відстоїть від центра вала на величину радіуса обертання  $r$ . Кінець лопаті описує окружність радіусом  $\rho$  при обертанні з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  у повздовжньо-вертикальній площині. Вісь приводного горизонтального вала (точка  $O$ ) рухається над рівнем поверхні ґрунту на постійній висоті  $H$ . Вісь обертання  $O$  також переміщується поступально з постійною швидкістю руху  $\vec{V}_0$ . Зв'яжемо з віссю приводного горизонтального вала (точка  $O$ ) прямокутну декартову систему координат  $xOz$ , у якій горизонтальна вісь  $Ox$  збігається з напрямком поступального руху очисника, а вісь  $Oz$  – спрямована вгору.



При цьому довжина лопаті дорівнює  $2l$ . Точка  $M$  є точкою удару еластичної лопаті по головці коренеплоду.

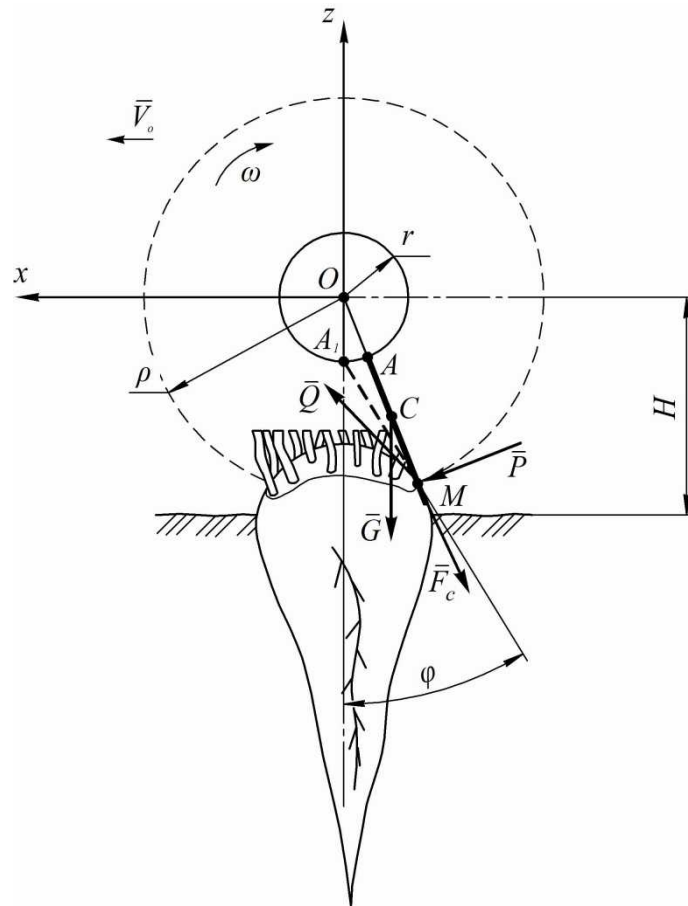


Рис. 1. Еквівалентна схема взаємодії гнучкої очисної лопаті з головкою коренеплоду буряка.

Початкова швидкість удару еластичної лопаті по головці коренеплоду буде складатися з відносної швидкості  $\vec{V}_r$  бича при його обертотому русі навколо точки  $O$  и переносної швидкості  $\vec{V}_o$  при поступальному переміщенні точки  $O$ . При цьому може бути два можливих варіанти. Перший, коли напрямок обертання лопаті здійснюється по ходу руху очисника (рис. 1), тоді вектори відносної швидкості лопаті  $\vec{V}_r$  й переносної швидкості  $\vec{V}_o$  складаються, тобто  $\vec{V} = \vec{V}_o + \vec{V}_r$ . Другий варіант, коли напрямок обертання лопаті здійснюється проти ходу руху очисника головок коренеплодів, тоді, при визначенні швидкості удару, зазначені вектори віднімаються  $\vec{V} = \vec{V}_r - \vec{V}_o$ .

Покажемо на еквівалентній схемі сили, що діють при взаємодії еластичної очисної лопаті й головки коренеплоду. Вважаємо, що в точці  $M$  прикладена сила  $\vec{P}$  – сила удару лопаті, спрямована перпендикулярно самій лопаті  $AM$  на самому початку її взаємодії з головкою коренеплоду буряка. Під час вільного обертання лопаті  $AM$  навколо



осі (точка  $O$ ) з кутовою швидкістю  $\omega$  виникає доцентрова сила  $\bar{F}_c$ , що буде дорівнює  $F_c = m\rho\omega^2$  й буде спрямована уздовж лопаті  $AM$ , що ставить лопать на одну пряму з радіусом  $r$  і шарніром  $A$ . При ударі лопаті об головку коренеплоду буряка, у фазі зустрічі, на лопать також діє сила ваги  $\bar{G}$  самої лопаті, що буде дорівнює:  $G = mg$  і буде зосереджена в центрі мас лопаті (точка  $C$ ) на відстані  $r + l$  від осі обертання й спрямована паралельно вертикальній осі  $Oz$ .

При побудові еквівалентної схеми лопатевого очисника нами були прийняті такі допущення:

- 1) очисна лопать  $AM$  є однорідною по всій своїй довжині;
- 2) при контакті очисної лопаті з коренеплодом буряка взаємодія сил відбувається тільки в точці  $M$  контакту очисної лопаті з головою коренеплоду;

- 3) допустима сила  $\bar{P}$  удару очисної лопаті по коренеплоду не перевищує допустиму силу на вибивання (вивертання) коренеплоду буряка із ґрунту, тобто  $P \leq [P]$ , де  $[P]$  допустима сила на вибивання коренеплоду буряка із ґрунту;

- 4) опір повітря при обертанні очисної лопаті не враховується.

Для подальшого детального аналітичного дослідження технологічний процес очищення головок коренеплодів буряка від залишків гички умовно розділяємо на дві фази:

- 1) фазу зустрічі очисної лопаті з головою коренеплоду буряка;
- 2) робочу фазу очищення головки коренеплоду буряка від гички.

Оскільки еластична очисна лопать  $AM$  рухається поступально разом зі своєю віссю обертання (точка  $O$ ) зі швидкістю  $\bar{V}_o$  й одночасно обертається навколо цієї ж осі з кутовою швидкістю  $\omega$ , то її кінетична енергія  $T$  буде дорівнювати:

$$T = \frac{mV_o^2}{2} + \frac{I_o\omega^2}{2}, \quad (1)$$

де  $I_o$  – момент інерції лопаті відносно осі обертання (точка  $O$ ).

Момент інерції  $I_o$  лопаті, згідно теореми Штейнера, буде дорівнювати:

$$I_o = I_c + m(r + l)^2, \quad (2)$$

де  $I_c$  – момент інерції лопаті  $AM$  відносно осі обертання, що проходить крізь центр мас лопаті (точка  $C$ ), паралельно осі обертання лопаті;

$r + l$  – відстань від центра мас лопаті до її осі обертання.

Підставляючи (2) в (1), одержуємо вираз для визначення кінетичної енергії очисної лопаті перед початком її ударного контакту з головою коренеплоду цукрового буряка:



$$T = \frac{mV_o^2}{2} + [I_c + m(r+l)^2] \frac{\omega^2}{2}. \quad (3)$$

Однак, у момент початку ударного контакту точка  $A$  (шарнірний підвіс лопаті  $AM$  до вала) продовжує обертатися навколо осі обертання приводного вала з кутовою швидкістю  $\omega$ , а точка  $M$  контакту кінця лопаті з головкою коренеплоду починає сповільнювати своє обертання в результаті цього ж контакту. Тому лопать починає повертатися у зворотну сторону навколо точки  $A$ , одночасно ковзаючи нижнім кінцем по поверхні головки коренеплоду, здійснюючи, таким чином, процес зчісування залишків гички з головки коренеплоду цукрового буряка.

Очевидно, що до початку ударного контакту з головкою коренеплоду буряка лопать  $AM$  перебуває на одній прямій з радіусом  $r$  приводного вала, що з'єднує точку  $O$  осі вала із точкою  $A$  підвісу лопаті, за довільний проміжок часу  $t$  повертаючись на кут  $\omega t$ , то після контакту з головкою коренеплоду вона починає повертатися вже на кут  $\omega t - \phi$ , де  $\phi$  – кут відхилення лопаті від положення, що приймала б ця лопать при вільному обертанні навколо точки  $O$ . Тому в цьому випадку лопать  $AM$  буде мати кутову швидкість, яка дорівнює  $\omega - \dot{\phi}$ , а кінетична енергія  $T$  лопаті при цьому буде дорівнювати:

$$T = \frac{mV_o^2}{2} + [I_c + m(r+l)^2] \frac{(\omega - \dot{\phi})^2}{2}. \quad (4)$$

Порівнюючи вирази (3) і (4) бачимо, що частина кінетичної енергії, що обумовлена залежністю (3), перетворюється в енергію удару й у корисну роботу зчісування гички з головки коренеплоду.

Відомо, що похідна за часом від кінетичної енергії матеріальної системи дорівнює сумі потужностей всіх зовнішніх і внутрішніх сил, прикладених до системи [9]. Зокрема, для абсолютно твердих тіл сума робіт, а значить і потужностей всіх внутрішніх сил дорівнює нулю. Тому, у цьому випадку, умовно вважаючи бічну частину головки коренеплоду абсолютно твердим тілом, одержуємо наступну рівність балансу потужності активних сил, що діють на коренеплід цукрового буряка при ударному контакті, і витраченої при цьому кінетичній енергії:

$$\frac{dT}{dt} = N, \quad (5)$$

де  $N$  – сумарна потужність активних сил, що діють на коренеплід цукрового буряка в момент часу  $t$ .

Слід зазначити, що при застосуванні теореми про зміну кінетичної енергії механічної системи не слід враховувати реакції в'язей без тертя, оскільки їх робота буде дорівнювати нулю.





Оскільки ділянка контакту очисної лопаті з головкою коренеплоду досить мала у порівнянні з довжиною траєкторії (кола радіуса  $r + 2l$ ), що проходить нижній кінець лопаті за один оберт навколо осі обертання, то можна вважати, що на цій ділянці кінець лопаті  $AM$  рухається поступально зі швидкістю, що дорівнює  $\bar{V} = \bar{V}_o + \bar{V}_r$ . Причому, оскільки контакт здійснюється в нижній частині згаданого кола (біля поверхні ґрунту), то в першому наближенні можемо вважати, що вектори  $\bar{V}_o$  й  $\bar{V}_r$  паралельні, а тому геометричну суму цих векторів можна замінити алгебраїчною, тобто  $V = V_o + V_r$ .

Очевидно, що відносна швидкість  $\bar{V}_r$  кінця лопаті  $AM$  перед початком ударного контакту за величиною буде дорівнює  $V_r = \omega(r + 2l)$ , а в період контакту вона дорівнює  $V_r = (\omega - \dot{\phi})(r + 2l)$ , де  $r + 2l$  – відстань від точки  $M$  контакту до осі  $O$  обертання приводного горизонтального вала.

Таким чином, у першому випадку:

$$V = V_o + \omega(r + 2l), \quad (6)$$

а в другому:

$$V = V_o + (\omega - \dot{\phi})(r + 2l). \quad (7)$$

Крім цього очевидно, що сила ваги  $\bar{G}$  лопаті  $AM$  занадто мала в порівнянні з ударною силою  $\bar{P}$  на початку контакту лопаті з головкою коренеплоду й мала в порівнянні із силою  $\bar{Q}$  зчісування залишків гички з головки коренеплоду в період контакту, а тому в рівнянні балансу потужностей і енергії нею можна знехтувати.

Таким чином, на початку контакту маємо рівність:  $N = PV$ , або  $N = P[V_o + \omega(r + 2l)]$ , а в період самого контакту – рівність:  $N = P[V_o + (\omega - \dot{\phi})(r + 2l)]$ .

Тоді рівняння (5) балансу потужності ударної сили  $P$  и втрат кінетичної енергії під час удару буде мати такий вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = P[V_o + \omega(r + 2l)]. \quad (8)$$

Диференціюючи вирази (4) за часом  $t$ , отримаємо:

$$\frac{dT}{dt} = [I_c + m(r + l)^2](\omega - \dot{\phi})\ddot{\phi}. \quad (9)$$

Прирівнявши праві частини виразів (8) і (9), будемо мати:

$$[I_c + m(r + l)^2](\omega - \dot{\phi})\ddot{\phi} = P[V_o + \omega(r + 2l)]. \quad (10)$$

Нехай далі,  $[P]$  – допустима ударна сила вибивання коренеплоду цукрового буряка із ґрунту при ударній взаємодії еластичної очисної лопаті з головкою коренеплоду. Заміняючи у виразі (10) ударну силу  $P$  на допустиму ударну силу  $[P]$ , одержуємо диференціальне рі-



вняння повороту очисної лопаті навколо точки  $A$  за умови не вибивання коренеплоду цукрового буряка із ґрунту на початку ударного контакту, тобто протягом дуже малого проміжку часу  $t$ , точніше, часу ударного контакту. Наступне, після ударне кутове переміщення очисної лопаті буде описуватися наступним диференціальним рівнянням:

$$\left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \dot{\varphi}) \ddot{\varphi} = Q \left[ V_o + (\omega - \dot{\varphi}) (r + 2l) \right], \quad (11)$$

де  $Q$  – сила зчісування залишків гички з головки коренеплоду цукрового буряка.

Диференціальне рівняння (10) можна замінити різницеvim рівнянням, використовуючи теорему про зміну моменту кількості руху механічної системи при ударній взаємодії:

$$I_A \omega_1 - I_A \omega_o = M_A(S), \quad (12)$$

де  $I_A$  – момент інерції очисної лопаті відносно точки  $A$ ;

$\omega_o$  – кутова швидкість лопаті відносно точки  $A$  до удару;

$\omega_1$  – кутова швидкість лопаті відносно точки  $A$  після удару;

$M_A(S)$  – момент імпульсу ударної сили відносно точки  $A$ .

При цьому ударний імпульс  $S$  буде дорівнювати:

$$S = \int_0^{\tau} P dt, \quad (13)$$

а момент зазначеного ударного імпульсу буде мати таке значення:

$$M_A(S) = 2l \int_0^{\tau} P dt, \quad (14)$$

де  $P$  – сила удару;

$2l$  – довжина очисної лопаті;

$\tau$  – тривалість удару.

Оскільки до ударного контакту очисна лопать не поверталася відносно точки  $A$ , а тому  $\omega_o = 0$ .

Тоді з виразів (12) і (14) при  $\omega_o = 0$  знаходимо кутову швидкість  $\omega_1$  лопаті в кутовому переміщенні відносно точки  $A$  після удару:

$$\omega_1 = \frac{2l \int_0^{\tau} P dt}{I_A}. \quad (15)$$

Якщо замінити силу  $P$  на силу  $[P]$ , то отримуємо:

$$\omega_1 = \frac{2l \int_0^{\tau} [P] dt}{I_A}, \quad (16)$$

а, з огляду на те, що  $[P] = const$ , будемо мати:



$$\omega_1 = \frac{2[P] l \tau}{I_A}, \quad (17)$$

де  $I_A = I_c + ml^2$ .

Таким чином, визначена кутова швидкість  $\omega_1$  лопаті відносно точки  $A$  після удару за умови не вибивання коренеплоду цукрового буряка із ґрунту.

Тому кутова швидкість очисної лопаті в обертальному русі відносно точки  $O$  після удару буде дорівнювати  $\omega - \omega_1$ .

Прийmemo далі в рівнянні (11), у першому наближенні, що  $\dot{\phi} = \omega_1$ . Таке допущення можна зробити через короткочасність контакту очисної лопаті з головкою коренеплоду буряка.

Тоді рівняння (11) значно спроститься й буде мати такий вигляд:

$$\left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1) \ddot{\phi} = Q \left[ V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right]. \quad (18)$$

З виразу (18) знаходимо кутове прискорення  $\ddot{\phi}$  очисної лопаті, яке буде дорівнювати:

$$\ddot{\phi} = \frac{Q \left[ V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right]}{\left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)}. \quad (19)$$

Після першого інтегрування виразу (19) одержуємо кутову швидкість  $\dot{\phi}$ , яка буде дорівнювати:

$$\dot{\phi} = \frac{Q \left[ V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t}{\left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + C_1. \quad (20)$$

Після другого інтегрування виразу (19) одержуємо закон кутового після ударного переміщення очисної лопаті по головці коренеплоду цукрового буряка, при якому здійснюється зчісування залишків гички з його головки:

$$\phi = \frac{Q \left[ V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t^2}{2 \left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + C_1 t + C_2. \quad (21)$$

Довільні сталі  $C_1$  й  $C_2$  знаходимо з наступних початкових умов: при  $t = 0$ :  $\dot{\phi} = \omega_1$ ,  $\phi = 0$ .

А тому одержуємо  $C_1 = \omega_1$ ,  $C_2 = 0$ .

Тоді вираз (21) прийме наступний вигляд:

$$\phi = \frac{Q \left[ V_o + (\omega - \omega_1) (r+2l) \right] t^2}{2 \left[ I_c + m(r+l)^2 \right] (\omega - \omega_1)} + \omega_1 t. \quad (22)$$

Силу  $Q$  зчісування залишків гички з головки коренеплоду цукрового буряка аналітично визначимо в такий спосіб.

Як зазначено в [10-11], черешок гички в поперечному перерізі, у загальному випадку, близький до трикутної форми, що має при підставі западину також трикутної форми (рис. 2).

Зазначені на рис. 2 розміри використовуємо надалі для розрахунку площі поперечного перерізу черешків гички.

Будемо вважати, що процес зчісування залишків гички відбувається безпосередньо на самій головці коренеплоду в місці виходу черешка з головки, тобто закріплення черешка, за рахунок деформації безпосереднього зрушення самого черешка гички. Очевидно, що процес зчісування буде можливий при такій умові:

$$\frac{Q}{nF} \geq [\tau], \quad (23)$$

де  $Q$  – сила зчісування;

$[\tau]$  – допустимі дотичні напруження зрушення для черешка гички;

$F$  – площа поперечного перерізу одного черешка гички;

$n$  – число черешків, які одночасно зчісуються зі сферичної поверхні головки коренеплоду цукрового буряка.

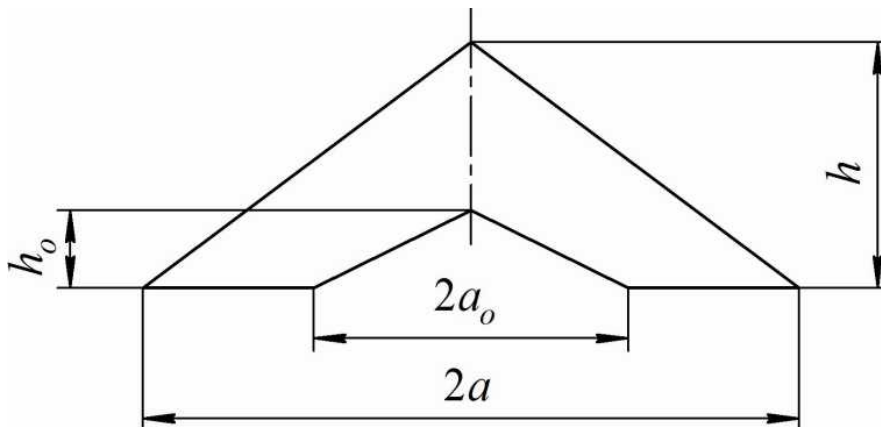


Рис. 2. Схема поперечного перерізу черешка гички цукрового буряка.

Обчислимо тепер необхідну для зчісування черешків гички з головки коренеплоду цукрового буряка силу  $Q$  зчісування. З умови (23) одержуємо:

$$Q \geq nF[\tau]. \quad (24)$$

Як бачимо з рис. 2, площа поперечного перерізу черешка гички цукрового буряка буде дорівнювати:

$$F = \frac{1}{2}2ah - \frac{1}{2}2a_0h_0, \quad (25)$$

або

$$F = ah - a_0h_0. \quad (26)$$



З огляду на вирази (24) і (26), знаходимо силу  $Q$  зчісування. Вона буде дорівнювати:

$$Q \geq (ah - a_o h_o) n [\tau]. \quad (27)$$

У першому наближенні будемо вважати, що одночасно зчісується ряд, що складається з п'яти черешків гички. Згідно [10-11], черешок гички цукрового буряку має наступні розміри:  $a = 5$  мм;  $a_o = 2$  мм;  $h = 5$  мм;  $h_o = 2$  мм. Середнє значення допустимого дотичного напруження  $[\tau]$  для матеріалу черешка гички цукрового буряку згідно [10-11] дорівнює:  $[\tau] = 1,14 \cdot 10^6$  Па.

Підставляючи значення наведених вище величин у вираз (27) одержуємо:

$$Q \geq (5 \cdot 5 - 2 \cdot 2) \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1,14 \cdot 10^6 = 119,7 \text{ Н.}$$

Приймаємо далі значення сили зчісування, що дорівнює  $Q = 120$  Н.

Задавшись часом  $t_1$  тривалості контакту очисної лопаті з головкою коренеплоду цукрового буряку, можна знайти кут  $\varphi_1$  повороту лопаті навколо точки  $A$  за час контакту:

$$\varphi_1 = \frac{Q [V_o + (\omega - \omega_1) (r + 2l)] t_1^2}{2 [I_c + m(r + l)^2] (\omega - \omega_1)} + \omega_1 t_1. \quad (28)$$

З виразу (28) можемо визначити кутову швидкість  $\omega$  обертання очисної лопаті навколо точки  $O$ , з урахуванням умови не вибивання коренеплоду цукрового буряку із ґрунту при здійсненні процесу зчісування залишків гички з головки коренеплоду:

$$\omega = \frac{Q V_o t_1^2}{2 [I_c + m(r + l)^2] (\varphi_1 - \omega_1 t_1) - Q (r + 2l) t_1^2} + \omega_1. \quad (29)$$

У такий же спосіб можна обчислити й інші параметри еластичної очисної лопаті, наприклад масу  $m$  лопаті або її довжину  $2l$ .

В отримані нами аналітичні вирази входить момент інерції  $I_c$  лопаті відносно осі, що проходить через центр мас лопаті (точка  $C$ ) паралельно осі обертання привідного вала (точка  $O$ ), який залежить від форми поперечного перерізу самої лопаті.

Для лопаті, що має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами  $2a \times 2b \times 2l$  зазначений момент інерції  $I_c$  буде дорівнювати [9]:

$$I_c = \frac{m}{3} (a^2 + l^2), \quad (30)$$

де  $2a$  – ширина лопаті;

$2l$  – довжина лопаті.

Якщо очисна лопать має форму прямого кругового циліндра, то її момент інерції  $I_c$  буде дорівнювати [9]:

$$I_c = \frac{m}{4} \left( \frac{4l^2}{3} + r_1^2 \right), \quad (31)$$

де  $r_1$  – радіус поперечного перерізу лопаті;

$2l$  – довжина лопаті.

Таким чином, у результаті проведеного теоретичного дослідження отримані в кінцевому вигляді аналітичні вирази, що дають можливість безпосередньо визначати конструктивні й кінематичні параметри еластичної очисної лопаті, що забезпечить ефективне зчісування залишків гички з головок коренеплодів цукрових буряків в процесі їх доочищення на корені.

Після складення програми на ПК в середовищі Mathcad були проведені чисельні розрахунки кінематичних параметрів технологічного процесу очищення головки коренеплоду цукрового буряку в залежності від конструктивних параметрів самого лопатевого очисника, фізико-механічних властивостей гички й умови не вибивання з ґрунту самого коренеплоду.

Данні цих розрахунків представлені на рис. 3-9.

Так, на рис. 3 представлений графік залежності кутової швидкості  $\omega$  обертального руху привідного горизонтального вала зі встановленою на ньому еластичною очисною лопаттю в залежності від часу  $t$  удару.

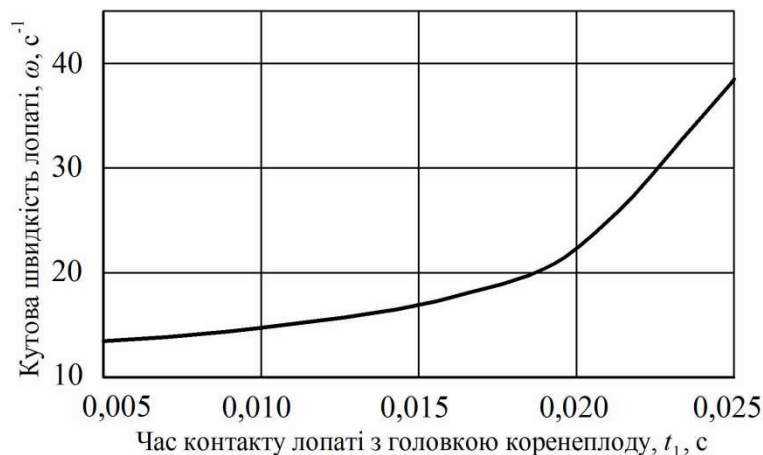


Рис. 3. Залежність кутової швидкості  $\omega$  обертального руху від часу  $t$  ударного контакту еластичної очисної лопаті з головкою коренеплоду цукрового буряку.

Як бачимо з представленої графічної залежності при збільшенні часу  $t$  ударної взаємодії еластичної очисної лопаті з головкою коренеплоду цукрового буряку зміна кутової швидкості  $\omega$  її обертального



руху має вигляд близький до експоненціального. При цьому зміна часу  $t$  контакту від 0,005 до 0,015 сек. Забезпечує більш стале значення кутової швидкості  $\omega$  обертального руху, значенням яких і слід віддавати перевагу.

Залежність кутової швидкості  $\omega$  обертального руху еластичної очисної лопаті від її довжини  $2l$  представлена на рис. 4. З отриманих графіків бачимо, що кутова швидкість  $\omega$  обертального руху еластичної очисної лопаті має залежність від її довжини  $2l$  також близьку до експоненціального вигляду. При цьому маса  $m$  лопаті майже не впливає на дану залежність.

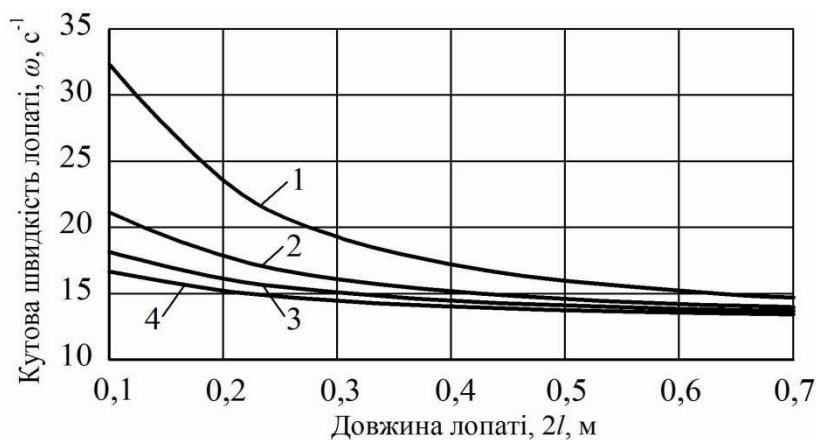


Рис. 4. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від довжини  $2l$  лопаті при різних значеннях її маси: 1 –  $m = 0,25$  кг; 2 –  $m = 0,40$  кг; 3 –  $m = 0,55$  кг; 4 –  $m = 0,70$  кг.

При цьому, як бачимо з даних графіків, для покращення впливу довжини  $2l$  лопаті на значення кутової швидкості  $\omega$  обертального руху еластичної очисної лопаті слід обирати довжини лопаті близькі до 0,3...0,4 м, що забезпечить мінімальні значення кутової швидкості  $\omega$ , при якій відбувається якісне очищення головок коренеплодів від залишків гички і не відбувається вибивання тіл коренебульбоплодів з ґрунту. При цьому маса  $m$  еластичної очисної лопаті, виходячи з даних графічних залежностей, повинна мати значення, яке не перевищує 0,4 кг.

Таким чином, барабан привідного горизонтального вала очисника головок коренеплодів від залишків гички на корені повинен мати радіус, який буде не меншим, ніж 0,30 м для встановлених раціональних значень довжини лопаті  $2l$ .

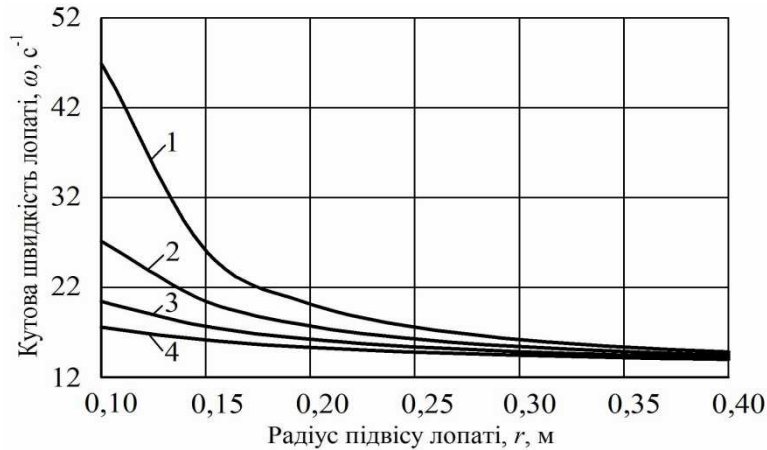


Рис. 5. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від радіусу  $r$  підвісулопаті при різних значеннях довжини лопаті  $2l$ : 1 –  $2l = 0,1$  м; 2 –  $2l = 0,2$  м; 3 –  $2l = 0,3$  м; 4 –  $2l = 0,4$  м

Що стосується залежностей кутової швидкості  $\omega$  від радіусу  $r$  підвісу лопаті, представлених на рис. 5, то збільшення значення вказаного конструктивного параметра також забезпечить мінімальні значення кутової швидкості  $\omega$  в разі застосування визначеної раніше довжини  $2l$  еластичної очисної лопаті.

Залежності кутової швидкості  $\omega$  від швидкості  $V_0$  поступального руху еластичної очисної лопаті, представлені на рис. 6, мають вид близький до лінійного. При цьому прослідковується наявний вплив на вказану залежність довжини  $2l$  самої лопаті. Однак, як бачимо з наведених графіків найбільш доцільною є поступальна швидкість  $V_0$ , яка не перевищує  $3,0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . При цьому довжина  $2l$  еластичної очисної лопаті також повинна бути близькою до  $0,4$  м.

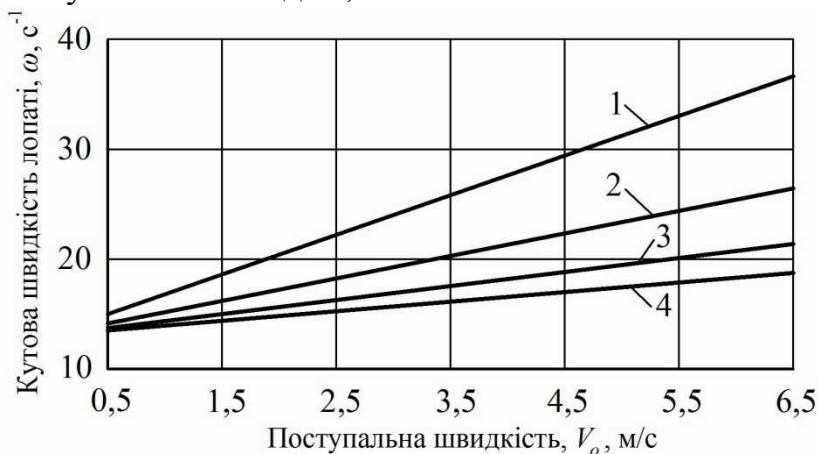


Рис. 6. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від швидкості  $V_0$  поступального руху при різних значеннях довжини лопаті  $2l$ : 1 –  $2l = 0,1$  м; 2 –  $2l = 0,2$  м; 3 –  $2l = 0,3$  м; 4 –  $2l = 0,4$  м.

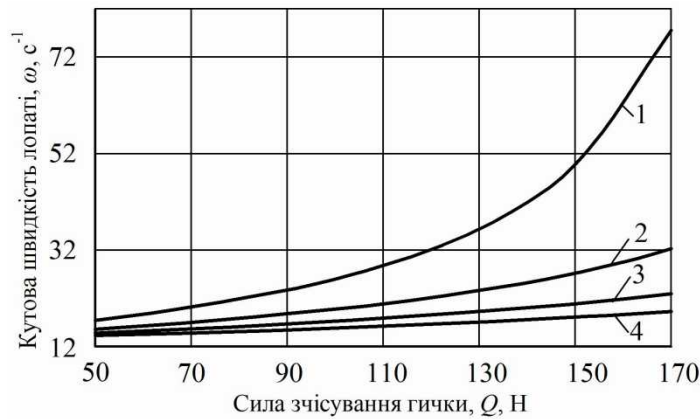


Рис. 7. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від сили зчісування  $Q$  при різних значеннях радіуса  $r$ : 1 –  $r = 0,1$  м; 2 –  $r = 0,15$  м; 3 –  $r = 0,2$  м; 4 –  $r = 0,25$  м.

Вплив сили зчісування  $Q$  на кутову швидкість  $\omega$ , як свідчать отримані графіки, що представлені на рис. 7, також мають вигляд, близький до лінійної залежності. При цьому, при застосуванні радіусу  $r$  підвісу, що дорівнює  $0,1$  м збільшення сили  $Q$  зчісування вимагає адекватного збільшення кутової швидкості  $\omega$  обертального руху очисної лопаті. У випадку використання радіусів  $r$  підвісу лопаті розмірів  $0,15 \dots 0,25$  м збільшення кутової швидкості  $\omega$  при збільшенні сили зчісування  $Q$  є менш інтенсивними, ніж у випадку, коли величина радіусу  $r$  обирається близькою до  $0,1$  м. Однак, в широкому діапазоні зміни сили  $Q$  зчісування, перевагу слід віддавати кутовій швидкості  $\omega$ , яка дорівнює  $32,0 \text{ s}^{-1}$ , а радіус  $r$  при цьому повинен бути не більшим, ніж  $0,25$  м.

Залежність кутової швидкості  $\omega$  обертального руху еластичної очисної лопаті від маси  $m$  самої лопаті представлена на рис. 8.

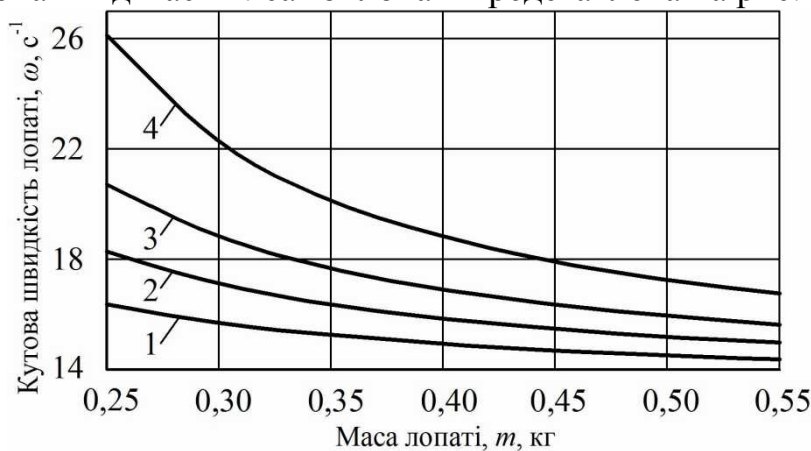


Рис. 8. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від маси  $m$  лопаті при різних значеннях сили  $Q$  зчісування: 1 –  $Q = 50$  Н; 2 –  $Q = 70$  Н; 3 –  $Q = 90$  Н; 4 –  $Q = 120$  Н.

Як бачимо з графіків, представлених на рис. 8 маса  $m$  еластичної очисної лопаті повинна бути не меншою, ніж 0,35...0,45 кг, яка забезпечить високу якість очистки головок коренеплодів від залишків гички на корені при значенні сили  $Q$  зчісування, яка не перевищує 90 Н. При цьому не відбудеться вибивання з ґрунту коренеплодів цукрових буряків.

Залежність кутової швидкості  $\omega$  обертального руху еластичної очисної лопаті, встановленої на привідному горизонтальному валу від довжини  $2l$  самої лопаті для різних форм поперечного її перерізу представлена на рис. 9.

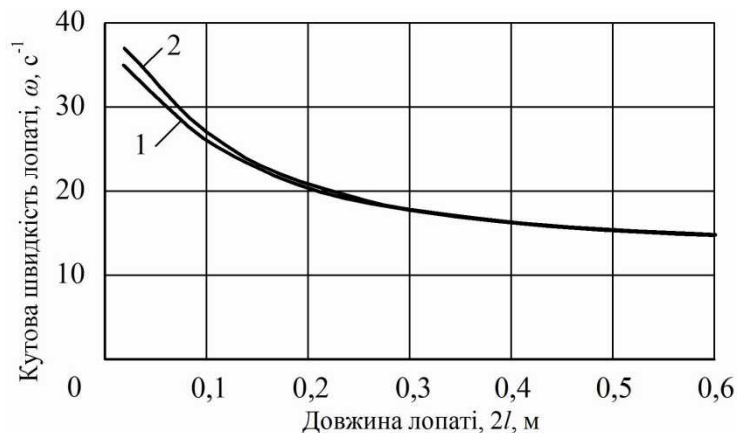


Рис. 9. Залежність кутової швидкості  $\omega$  від довжини  $2l$  лопаті для різних форм поперечного перерізу лопаті: 1 – прямокутна; 2 – кругла.

Як бачимо з представлених графіків, форма поперечного перерізу еластичної очисної лопаті має вплив на кутову швидкість  $\omega$  обертального руху самої лопаті тільки при малих значеннях її довжини  $2l$ . У випадку, коли обирати довжину  $2l$  очисної лопаті, визначену раніше як оптимальну (0,4 м), при інших конструктивних і силових параметрах очисника, які теж приймаються як раціональні, то форму самої очисної лопаті можна не враховувати.

Таким чином, на підставі чисельного моделювання на ПК встановлено, що найбільш раціональними кінематичними й конструктивними параметрами очисника головок коренеплодів цукрових буряків на корені, що забезпечують високі показники якості очищення головок від залишків гички та не вибивання тіл коренеплодів з ґрунту є: швидкість  $V_0$  поступального руху не менша, ніж 2,5...3,0  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ , довжина  $2l$  еластичної очисної лопаті повинна бути не меншою ніж 0,4 м, а радіус  $r$  барабана (тобто радіус підвісу лопаті) також не менш ніж 0,3 м. Форма еластичної очисної лопаті на має суттєвого впливу (з точки зору динаміки процесу) на якість очищення головок коренеплодів цу-



крових буряків від залишків гички.

*Висновки.* 1. Очищення головок коренеплодів цукрових буряка від залишків гички на корені є актуальною й складною задачею галузі механізації буряківництва, що не знайшла дотепер ефективного, точного й остаточного рішення. Тому теоретичні й експериментальні дослідження, які дозволяють визначити оптимальні конструктивні й кінематичні параметри робочих органів очисників головок коренеплодів від залишків гички дозволяють не тільки вдосконалити вказаний технологічний процес, а й дадуть можливість створити нові більш ефективні зразки очисників.

2. Розроблена нова теорія взаємодії гнучкої очисної лопаті, що встановлена на приводному горизонтальному валу, і головки коренеплоду буряка, закріпленою в ґрунті, заснована на застосуванні теорем про зміну кінетичної енергії механічної системи й про зміну кількості руху, а також теорії удару, дала можливість із високим ступенем точності моделювати зазначений процес очищення з урахуванням створення необхідної сили зчісування й умови не вибивання коренеплодів буряка із ґрунту.

3. Отримані в кінцевому вигляді рішення диференціального рівняння руху гнучкої очисної лопаті по головці коренеплоду буряка дали можливість одержати нові аналітичні вирази для визначення кута повороту й кутової швидкості обертового руху очисної лопаті, встановленої на приводному горизонтальному валу з умов ефективного зчісування залишків гички й не руйнування зв'язків із ґрунтом коренеплодів буряка, при різному значенні її геометричних розмірів і форми: прямокутного паралелепіпеда й прямого кругового циліндра. Отримане також новий аналітичний вираз для визначення сили зчісування черешків гички зі сферичної поверхні головки коренеплоду цукрового буряка.

4. Результати чисельного моделювання на ПК показали, що раціональними кінематичними й конструктивними параметрами очисника головок коренеплодів цукрових буряків на корені, що забезпечують високі показники якості очищення головок від залишків гички та не вибивання тіл коренеплодів з ґрунту є: швидкість  $V_0$  поступального руху не менша, ніж  $2,5 \dots 3,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , довжина  $2l$  еластичної очисної лопаті повинна бути не меншою ніж  $0,4 \text{ м}$ , а радіус  $r$  барабана (тобто радіус підвісу очисної лопаті) також не менш ніж  $0,3 \text{ м}$ . Маса  $m$  еластичної очисної лопаті повинна бути не меншою ніж  $0,4 \text{ кг}$ , а сила  $Q$  зчісування  $90 \dots 110 \text{ Н}$ . Форма еластичної очисної лопаті (квадратна чи кругла) не має суттєвого впливу на якість очищення головок коренеплодів цукрових буряків від залишків гички.

*Література*

1. *Погорельий Л. В.* Свеклоуборочные машины / Л. В. Погорельий, Н. В. Татьянако, В. В. Брей и др. – Киев: Техніка, 1983. – 168 с.
2. *Bulgakov V.* Експериментальні дослідження нового робочого органу для доочистки головок коренеплодів цукрових буряків / V. Bulgakov, W. Orechiwski, E. Krasowski, Z. Burski// Current problems of agricultural engineering in an aspect of integration of Poland with European Union: Jubilee international scientific conference XXX years of Agricultural Engineering Faculty at Agricultural University of Lublin. – Lublin: WAR, 2000. – P. 399-410.
3. *Булгаков В. М.* Диференціальні рівняння руху гнучкої очисної лопати по поверхні головки коренеплоду / В. М. Булгаков, І. В. Головач//Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Глеваха, 2002. – Вип. 86. – С. 160-165.
4. *Булгаков В. М.* Теорія очистки головок коренеплодів на корені гнучкою лопаттю / В. М. Булгаков, І. В. Головач // Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2003. – Вип. 60. – С. 66-86.
5. *Lammers S.* Defoliation of sugar beets – assessment of quality and gain in delivered beet mass / S. Lammers, P. Olaf, R. Olaf // Landtechnik. – 2010. – №6.– P. 464-467.
6. *Ліннік А.* Визначення динамічних параметрів жорсткого очисника при взаємодії з коренеплодом / А. Ліннік // Вісник ТНТУ. – 2014. – Том 73. – № 1. – С.165-171.
7. *Мартыненко В. Я.* Обоснование конструктивных параметров очистителей головок корнеплодов / В. Я. Мартыненко // Материалы международной научно-практической конференции “Проблемы и перспективы создания свеклоуборочной техники”. – Винница, 1996. – С. 41-44.
8. *Гурченко А. П.* Механизация уборки ботвы сахарной свеклы / А. П. Гурченко, Я. В. Савченко // Техника в сельском хозяйстве. – Москва: Урожай, 1986. – № 9. – С. 15-17.
9. *Бутенин Н. В.* Курс теоретической механики / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – Том 2. – Москва: Наука, 1985. – 496 с.
10. *Булгаков В. М.* Бурякозбиральні машини. Монографія / В. М. Булгаков. – Київ: Аграрна наука, 2011. – 351 с.
11. *Хелемендик М. М.* Напрями і методи розробки робочих органів сільськогосподарських машин. Монографія / М. М. Хелемендик. – Київ: Аграрна наука, 2001. – 280 с.
12. *Bulgakov V.* Theoretical investigations in cleaning sugar beet heads from remnants of leaves by cleaning blade / V. Bulgakov, S. Ivanovs, I. Golovach, Z. Ruzhylo. –15 – th International scientific conference “En-





- gineering for rural development”, Proceedings, Vol. 15. May 25-27, 2016. Jelgava. –P. 1090-1097.
13. *Smith L.* The effect of defoliator flail configuration, speed and crown removal on sugarbeet yield, quality and profitability / L. Smith // Sugarbeet Research and Extension Reports. – 1991. – Vol. 22. – P. 222-227.
14. *Lilleboe D.* Optimizing defoliator & harvester performance / D. Lilleboe // The sugarbeet grower. – July 2014. – Vol. 53., №6. – P. 6-13.
15. *Ihnatiev Ye.* Theoretical substantiation of topping parameters without sugar beet head copying / Ye. Ihnatiev // Mechanization in agriculture. – Sofia, 2016. – Issue2. – P. 10-12.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ГОЛОВОК КОРНЕПЛОДОВ СВЕКЛЫ ГИБКОЙ ОЧИСТНОЙ ЛОПАСТЬЮ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПРИВОДНОМ ВАЛУ**

В.М. Булгаков, Е.И. Игнатьев

**Аннотация** – наиболее распространенной в мире технологией уборки ботвы сахарной свеклы является сплошной срез всего массива зеленой ботвы, ее сбор для использования при производстве биогаза и дальнейшая дообрезка верхних частей головок корнеплодов от остатков, которая осуществляется на корню. По такой схеме работает большинство ботвоуборочных машин, которые выпускаются сейчас в мире. Однако проведенными сейчас исследованиями установлено, что при дообрезке верхних частей головок корнеплодов теряется до 10% сахароносной массы. Кроме этого возникает острая потребность в немедленной переработке корнеплодов сахарной свеклы, поскольку при обрезании головок корнеплодов со временем происходит потеря сахарного сока, а через срезанную часть внутрь корнеплода попадают бактерии, которые вызывают загнивание и, как правило, полную потерю, всего корнеплода. Поэтому более благоприятной операцией при уборке ботвы является не обрезание головок, а их очистка от остатков ботвы. При этом к доочистке корнеплодов сахарной свеклы от остатков ботвы предъявляются довольно высокие требования, обусловленные отсутствием наличия на головках корнеплодов зеленых и сухих остатков, а также потерь и повреждений самих головок корнеплодов. Целью данного исследования есть разработка наиболее полной теории взаимодействия гибкой очистительной лопасти с головкой корнеплода сахарной свеклы на корню, в процессе ее очистки, когда лопать устанавливается на горизонтальном приводном вале. Для исследования использовались



методы моделирования, высшей математики и теоретической механики, в частности теоремы об изменении кинетической энергии механической системы, теоремы об изменении момента количества движения механической системы, теории удара, составление и решение в замкнутом виде дифференциальных уравнений движения, а также составление программ и проведение численных расчетов на ПК. В результате проведенного исследования была разработана эквивалентная схема и составлено новое дифференциальное уравнение движения гибкой очистительной лопасти по поверхности головки корнеплода сахарной свеклы, которая установлена на приводном горизонтальном вале. Исходя из условий создания необходимой силы счесывания и не выбивания из почвы корнеплодов свеклы, с учетом размерных и массовых характеристик корнеплодов сахарной свеклы, получены новые конечные выражения для определения угла поворота и угловой скорости вращательного движения гибкой очистительной лопасти при различных значениях ее геометрических размеров и формы: прямоугольного параллелепипеда и прямого кругового цилиндра. Получено также новое аналитическое выражение для определения силы счесывания черешков ботвы со сферической поверхности головки корнеплода сахарной свеклы. На основании проведенного численного моделирования на ПК определены рациональные кинематические и конструктивные параметры очистителя головок корнеплодов сахарной свеклы, которые обеспечивают высокие показатели качества очистки головок от остатков ботвы. К этим параметрам относятся: скорость поступательного движения, которая должна быть не менее, чем  $2,5...3,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , длина эластичной очистительной лопасти должна быть не менее чем  $0,4 \text{ м}$ , масса  $0,4 \text{ кг}$ , радиус барабана –  $0,25...0,3 \text{ м}$ , а сила счесывания  $90...110 \text{ Н}$ .

## THEORETICAL RESEARCH OF BEET ROOT CROPS HEAD CLEANING BY ELASTIC CLEANING FLAIL WHICH IS MOUNTED ON HORIZONTAL DRIVE SHAFT

V. Bulgakov, Ye. Ihnatiev

### *Summary*

The most widespread in the world technology of harvesting sugar beet tops is the topping all green petiole and leaves, its collecting for use in biogas production and further scalping of the upper part of the root crops head from the tops remains, which is carried out on a root. According to this scheme works most topping machines that are manufactured in the world today. However, research carried out today found that



cutting of top parts of root crops heads leads to lost up to 10% of sugar-bearing plant materials. After scalping there is a need for immediate processing of sugar beet root crops, as there is a loss of sugar juice and through the cut-off parts in a root crop enter bacteria which cause rotting and loss of a root crop. Therefore, a more favorable operation for tops harvesting is not scalping, but heads cleaning from tops remains. Therefore, high requirements are imposed to cleaning of root crops of sugar beet from tops remains, caused by lack of presence on heads of root crops of the green and dry remains, as well as loss or damage of root crops heads. The purpose this research is development of the general theory of interaction of elastic cleaning flail with sugar beet head on a root, in the process of cleaning tops residues when the flail is mounted on a horizontal shaft and obtains results of numerical modeling of its kinematic and structural parameters. In the theoretical study were used methods of modeling, higher mathematics and theoretical mechanics, in particular theorem of mechanical system kinetic energy change, theorem of mechanical system angular momentum change, theory of impact, drawing up and the solution in closed form of differential equations of motion, as well as programming and carrying out numerical calculations on the PC. As a result of the conducted theoretical research the equivalent scheme was developed and the differential equation of the movement of the elastic cleaning flail on a surface of root crop head of sugar beet which is mounted on a horizontal drive shaft. Based on the conditions for the creation of necessary crumpling force and not knocking-out from soil of root crops beet, taking into account dimensional and mass characteristics of sugar beet obtained new result-expressions to determine the angle of rotation and the angular velocity of the rotational motion of elastic cleaning flails for different values of its geometric dimensions and shapes: rectangular parallelepiped and circular cylinder. A new analytical expression to determine the crumpling force of beet tops stalks with the spherical surface of the sugar beet head. On the basis of numerical modeling on the PC were determined rational kinematic and structural parameters of sugar beet heads cleaner on a root, which ensure high-quality heads cleaning from beet tops residue and not knocking-out bodies of root crops from the soil. These parameters include: speed of translational motion, which shall not be less than  $2.5...3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , length of the elastic flail should not be less than 0.4 m, weight 0.4 kg, drum radius – 0.25...0.3 m, and crumpling force 90...110 N.