



Механізація, електрифікація

УДК 631.358.44/45

© 2017

В.В. Адамчук,

*академік НААН,
доктор технічних наук*

*Національний науковий
центр «Інститут
механізації та
електрифікації сільського
господарства»*

В.М. Булгаков,

*академік НААН,
доктор технічних наук*

І.В. Головач,

доктор технічних наук

С.В. Смолінський,

кандидат технічних наук

*Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України*

Є.І. Ігнат'єв

*Таврійський державний
агротехнологічний
університет*

ТЕОРІЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БУЛЬБИ КАРТОПЛІ ЗА СЕПАРАЦІЇ ВОРОХУ

Мета. Підвищення ефективності та якості сепарації картопляного вороху теоретичним обґрунтуванням раціональних параметрів сепаратора за умови непошкодження бульб під час їх ударної взаємодії. **Методи.** Теоретичні дослідження ударної взаємодії проводили із застосуванням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, методів складання програм для числових розрахунків на ПК та побудови графічних залежностей, а також аналізу отриманих результатів.

Результати. Розроблено еквівалентну схему ударної взаємодії бульби картоплі з еластичною поверхнею відбивального транспортера. З урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості бульби під час удару отримано аналітичні вирази для визначення величини і напрямку швидкості бульби після удару. Це дало змогу на підставі застосування теореми про зміну кількості руху під час удару отримати аналітичні вирази для визначення ударного імпульсу і сили удару бульби об еластичну поверхню відбивального транспортера. **Висновки.** Побудовано нову розрахункову математичну модель ударної взаємодії бульби картоплі за сепарації вороху. На основі отриманих теоретичних результатів досліджено раціональні кінематичні параметри якісного виконання зазначеного технологічного процесу за умови непошкодження бульб картоплі.

Ключові слова: картопля, бульба, сепарація вороху, ударна взаємодія, ударний імпульс, еквівалентна схема.

Картоплярство є досить енерговитратною галуззю сільського господарства. Тому за розробки нових і вдосконалення наявних

робочих органів картоплезбиральних машин слід забезпечити значне зменшення їх енергоємності та істотне підвищення

якості отриманої продукції з мінімальними втратами під час збирання врожаю. Однією з важливих технологічних операцій під час збирання картоплі є сепарація картопляного вроху, яка забезпечує чистоту отриманої продукції. Отже, очисні робочі органи — основна ланка в забезпеченні якісних показників роботи картоплезбиральної машини. З цією метою буде розроблено нову конструкцію сепаратора картопляного вроху, захищену патентом України [1].

Експериментальні дослідження показали, що деяка частина бульб картоплі і ґрунтових домішок з розмірно-масовими характеристиками, подібними до бульб, перелітає через очисні робочі органи на поверхню поля або потрапляє до вивантажувального транспортера. Це призводить до втрат врожаю і забруднення отриманої продукції ґрунтовими домішками. Тому для виключення перелітання бульб через сепаратор пропонується встановити відбивальний стрічковий гумовий гладкий транспортер. При цьому бульба, що відірвалася від сепарувальної поверхні, ударяється об еластичну поверхню відбивального транспортера і знову повертається на сепарувальну поверхню. Однак у результаті ударної взаємодії бульби з поверхнею транспортера можливе її пошкодження, що загалом може призвести до зниження якості продукції. Тому забезпечити непошкодження бульб картоплі за ударної взаємодії є досить актуальним завданням, вирішення якого неможливе без проведення теоретичних досліджень, зокрема побудови потрібної математичної моделі ударної взаємодії. Це дасть змогу обґрунтувати раціональні кінематичні параметри роботи сепаратора за умови непошкодження бульб картоплі під час збирання врожаю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сепарувальні робочі органи, які використовують у сучасних картоплезбиральних машинах, мають не лише забезпечувати надійне та якісне виконання технологічного процесу очищення бульб картоплі від ґрунтових домішок, рослинних решток та налиплого ґрунту, а й бути здатними до самоочищення в процесі роботи, що забезпечуватиме відповідну продуктивність праці. Однак більшість систем сепарувальних робочих органів, застосовуваних на серійних

картоплезбиральних комбайнах, не завжди забезпечує високий рівень сепарації ґрунтових домішок [2] через інтенсивне забруднення очисних поверхонь сепарувальних робочих органів вологим ґрунтом.

Над проблемою створення ефективних і надійних у роботі сепараторів картопляного вроху під час його збирання та різноманітних очисників, які застосовують на стаціонарних картоплеочисних пунктах, працювало багато вчених і конструкторів [3–7]. Найперспективнішими і технологічно придатними для очищення бульб картоплі під час її викопування з ґрунту за різних ґрунтово-кліматичних умов збирання є спіральні сепаратори. Однак попри значну кількість технологічних процесів очищення картопляного вроху під час збирання досліджень з оптимізації кінематичних і конструктивних параметрів спіральних сепараторів порівняно мало. Особливо це стосується забезпечення умов непошкодження бульб картоплі за їх взаємодії зі спіральними навивками, відбивання від різних поверхонь і подальших ударних контактів з іншими робочими органами.

Мета досліджень — підвищення ефективності та якості сепарації картопляного вроху теоретичним обґрунтуванням раціональних параметрів сепаратора за умов непошкодження бульб за їх ударної взаємодії.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження ударної взаємодії проводили із застосуванням основних положень вищої математики, теоретичної механіки, методів складання програм для числових розрахунків на ПК та побудови графічних залежностей, а також аналізу отриманих результатів.

Результати досліджень. Теоретичне обґрунтування кінематичних параметрів роботи сепаратора картопляного вроху проведено на основі побудови математичної моделі ударної взаємодії бульби картоплі з еластичною поверхнею рухомого відбивального транспортера. Для цього насамперед потрібно побудувати еквівалентну схему зазначеної ударної взаємодії (рисунок).

На еквівалентній схемі покажемо нахилений під кутом β до горизонту рухомий відбивальний транспортер, об нижню робочу

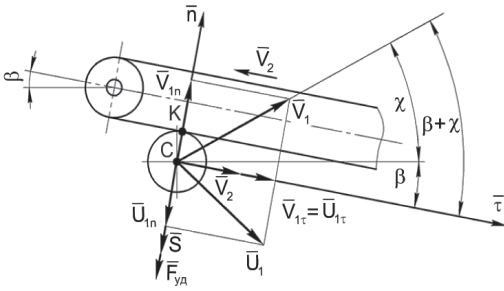


Схема ударної взаємодії бульби картоплі з нижньою поверхнею рухомого відбивального транспортера

гілку якого здійснюється ударний контакт бульби картоплі, що відірвалася від сепарувальної поверхні сепаратора, і траєкторія польоту якої перетинається з нижньою поверхнею транспортера в точці ударного контакту К. При цьому для спрощення аналітичних викладок тіло бульби апроксимуємо формою кулі. Очевидно, що бульба за поступального руху по деякій траєкторії польоту в повітрі може здійснювати під впливом моменту сили тертя і деяких інших факторів, які діють на неї в момент її відриву від сепарувальної поверхні, обертальний рух навколо якоїсь зі своїх осей. Проте за ударної взаємодії вплив обертального руху на її величину неістотний. Отже, в першому наближенні можна вважати, що бульба здійснює лише поступальний рух уздовж своєї траєкторії польоту. Крім того, з огляду на незначні розміри і масу бульби порівняно з розмірами і масою транспортера її можна вважати матеріальною точкою. Тому сили, що діють на бульбу в точці К її контакту з поверхнею транспортера під час удару, можна вважати прикладеними до центра мас бульби (точка С) (див. рисунок).

Оскільки вирішальну роль у процесі значеного ударного контакту відіграє нормальна складова ударного імпульсу, то для дослідження процесу удару виберемо натуральну систему координат $\tau\bar{C}\bar{n}$ із початком координат у центрі бульби (точка С), вісь $\bar{\tau}$ якої направимо паралельно нижній гілці транспортера, а вісь \bar{n} — перпендикулярно до цієї гілки (у напрямі дії нормальної складової ударного імпульсу) (див. рисунок).

Покажемо на еківалентній схемі такі вектори швидкостей: \bar{V}_1 — швидкість бульби

до удару; \bar{V}_2 — швидкість стрічки транспортера; \bar{U}_1 — швидкість бульби після удару.

При цьому вектор швидкості \bar{V}_1 направлений під кутом χ до горизонту, вектор швидкості \bar{V}_2 — під кутом β до горизонту.

У результаті кут між векторами \bar{V}_1 і \bar{V}_2 дорівнюватиме $\beta + \chi$ (див. рисунок).

Розглянемо удар бульби масою m об рухомий транспортер маси M , що рухається із швидкістю \bar{V}_2 . Порівняно з масою бульби можна вважати, що маса транспортера $M \rightarrow \infty$. Припускаємо при цьому, що удар є косим, частково пружним (коефіцієнт відновлення швидкості під час удару $K < 1$) [8].

Визначимо швидкість бульби і транспортера після удару відповідно до загальної методики [9], яка враховує найбільш загальний випадок удару 2-х тіл, що мають різні маси і швидкості. Згідно із цією методикою визначимо проекції швидкостей бульби і транспортера до удару на осі координат \bar{n} і $\bar{\tau}$:

$$\begin{aligned} V_{1n} &= V_1 \sin(\beta + \chi), \\ V_{1\tau} &= V_1 \cos(\beta + \chi), \\ V_{2n} &= 0, \\ V_{2\tau} &= V_2. \end{aligned} \quad (1)$$

За цією самою методикою визначаємо проекцію загальної швидкості \bar{U} обох тіл на вісь \bar{n} у кінці абсолютно непружного удару:

$$U_n = \frac{mV_{1n} + MV_{2n}}{m + M}. \quad (2)$$

Оскільки $V_{2n} = 0$, а $M \rightarrow \infty$, то $U_n = 0$.

Тоді проекції швидкостей бульби і транспортера на осі \bar{n} і $\bar{\tau}$ після удару визначатимуться за виразами [9–11]:

$$\begin{aligned} U_{1\tau} &= V_{1\tau}, \\ U_{2\tau} &= V_{2\tau}, \\ U_{1n} &= U_n(k + 1) - kV_{1n}, \\ U_{2n} &= U_n(k + 1) - kV_{2n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Після підстановки обчислених значень проекцій швидкостей до удару (1) та значення $U_n = 0$ у вираз (3) отримаємо:

$$\begin{aligned} U_{1\tau} &= V_1 \cos(\beta + \chi), \\ U_{2\tau} &= V_2, \\ U_{1n} &= -kV_1 \sin(\beta + \chi), \\ U_{2n} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

При цьому модулі швидкостей бульби і транспортера після удару відповідно дорівнюватимуть:

$$U_1 = \sqrt{U_{1\tau}^2 + U_{1n}^2} = V_1 \sqrt{\cos^2(\beta + \chi) + k^2 \sin^2(\beta + \chi)}, \quad (5)$$

$$U_2 = \sqrt{U_{2\tau}^2 + U_{2n}^2} = V_2.$$

Напрями швидкостей тіл після удару утворюють кути з нормаллю, тангенси яких дорівнюють:

$$\operatorname{tg}(\hat{n}, \hat{U}_1) = \frac{U_{1\tau}}{U_{1n}} = -\frac{\operatorname{ctg}(\beta + \chi)}{k}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg}(\hat{n}, \hat{U}_2) = \frac{U_{2\tau}}{U_{2n}} = \infty.$$

Визначимо далі силу удару бульби по площині рухомого транспортера.

Для цього застосуємо теорему про зміну кількості руху бульби під час удару, що у векторній формі має вигляд:

$$m(\bar{U}_1 - \bar{V}_1) = \bar{S}, \quad (7)$$

де m — маса бульби; \bar{S} — ударний імпульс.

Запишемо рівняння (7) удару бульби по рухомій площині транспортера в проєкціях на осі \bar{n} і $\bar{\tau}$:

$$\left. \begin{aligned} m(U_{1n} - V_{1n}) &= S_n, \\ m(U_{1\tau} - V_{1\tau}) &= S_\tau. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Після підстановки у вираз (8) отриманих вище значень проєкцій швидкостей U_{1n} , V_{1n} , $U_{1\tau}$, $V_{1\tau}$ отримаємо такі значення проєкцій ударного імпульсу на осі \bar{n} і $\bar{\tau}$:

$$\left. \begin{aligned} S_n &= -mV_1 \sin(\beta + \chi) \cdot (k + 1), \\ S_\tau &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Враховуючи, що загальний імпульс S визначається з виразу:

$$S = \sqrt{S_\tau^2 + S_n^2}, \quad (10)$$

отримаємо, що $S = S_n$, тобто:

$$S = -m \cdot (k + 1) \cdot V_1 \sin(\beta + \chi). \quad (11)$$

Після визначення ударного імпульсу S можна в деякому наближенні визначити силу удару $F_{уд}$ бульби по рухомому транспортеру. Для цього скористаємося інтегральним виразом для обчислення ударного імпульсу через силу удару [8]:

$$\bar{S} = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \bar{F}_{уд} dt, \quad (12)$$

де $\bar{F}_{уд}$ — сила удару; Δt — тривалість удару.

Тоді за теоремою про середнє в інтегральному численні можна написати:

$$S = F_{уд. ср} \Delta t, \quad (13)$$

де $F_{уд. ср}$ — середня ударна сила за час удару Δt .

З виразу (13) знаходимо:

$$F_{уд. ср} = \frac{S}{\Delta t}. \quad (14)$$

Згідно з виразом [8] максимальна сила удару $F_{уд}$ приблизно дорівнює:

$$F_{уд} = 2F_{уд. ср}, \quad (15)$$

або, враховуючи вираз (14):

$$F_{уд} = \frac{2S}{\Delta t}. \quad (16)$$

Підставляючи вираз (11) у вираз (16) отримуємо:

$$F_{уд} = -\frac{2m(k + 1)V_1 \sin(\beta + \chi)}{\Delta t}. \quad (17)$$

Знак «—» у виразах (11) і (17) означає, що напрям векторів \bar{S} та $\bar{F}_{уд}$ є протилежним напрямку осі \bar{n} . Проте в цьому разі головним є абсолютне значення цих величин, тому в наступних виразах знак «—» можна опустити.

Бульба картоплі не пошкоджуватиметься за умови:

$$F_{уд} \leq [F_{уд}], \quad (18)$$

де $[F_{уд}]$ — допустима сила удару бульби картоплі об поверхню транспортера, за якої сама бульба не пошкоджується.

Отже, враховуючи вираз (17), матимемо нерівність:

$$\frac{2m(k + 1)V_1 \sin(\beta + \chi)}{\Delta t} \leq [F_{уд}]. \quad (19)$$

З отриманої нерівності (19) знаходимо обмеження на значення швидкості V_1 бульби картоплі перед ударом об поверхню транспортера за умови її непошкодження:

$$V_1 \leq \frac{[F_{уд}] \Delta t}{2m(k + 1) \sin(\beta + \chi)}. \quad (20)$$

Таким чином отримано динамічну умову непошкодження бульби картоплі за її удару об рухому поверхню транспортера.

Обчисливши допустиму швидкість бульби картоплі до удару, можна визначити конструктивні і кінематичні параметри сепарувального робочого органу, які забезпечать цю швидкість. У роботі [12] отримано вираз для визначення швидкості бульби картоплі до удару для спірального сепаратора:

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 - 2gH}, \quad (21)$$

де H — висота польоту бульби від сепарувальної поверхні до точки ударного контакту; V_0 — швидкість бульби картоплі в момент відриву від сепарувальної поверхні.

Причому:

$$V_0 = \omega r_i, \quad (22)$$

де ω — кутова швидкість обертання спіралі навколо своєї поздовжньої осі:

$$r_i = R_1 + R_6, \quad (23)$$

де R_1 — радіус спіралі; R_6 — радіус бульби картоплі.

З урахуванням виразів (21), (22) і (23) можна визначити допустиму кутову швидкість

обертання спіралі за умови непошкодження бульби картоплі:

$$\omega = \frac{\sqrt{V_1^2 + 2gH}}{R_1 + R_6}, \quad (24)$$

або радіус R_1 спіралі за заданої кутової швидкості ω її обертання:

$$R_1 = \frac{\sqrt{V_1^2 + 2gH}}{\omega} - R_6. \quad (25)$$

Очевидно, що наведені в роботі теоретичні результати можуть бути використані під час дослідження ударної взаємодії різних видів коренебульбоплодів із поверхнями різноманітних робочих органів сільськогосподарських машин.

Висновки

Побудовано нову розрахункову математичну модель ударної взаємодії бульби картоплі під час сепарації вороху. Отримано аналітичні вирази для обчислення ударного імпульсу і сили удару бульби об еластичну поверхню відбивального транспортера залежно від кінематичних параметрів сепаратора. Аналітично визначено динамічні

обмеження допустимої швидкості бульби картоплі перед ударною взаємодією за умови її непошкодження.

Наведені в роботі теоретичні результати можуть бути використані під час дослідження ударної взаємодії різних видів коренебульбоплодів із поверхнями різноманітних робочих органів сільськогосподарських машин.

Бібліографія

1. Патент України № 43907. A01D33/08/ Очисник вороху коренебульбоплодів від домішок/В.М. Булгаков, П.Ю. Зиков, С.В. Смолінський, М.Г. Березовий, А.Л. Бондаренко. Опубл. 15.01.2002, бюл. № 1.
2. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. — М.: Машиностроение, 1984. — 320 с.
3. Смолінський С.В. Експериментальне визначення параметрів спірального сепаратора картоплезбиральних машин//Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. — Луцьк: Ред-вид. відділ ЛДТУ, 2001. — Вип. 8. — С. 265–271.
4. Смолінський С.В. Про теоретичний розрахунок параметрів та режимів роботи спірального сепаратора картопляного вороху//Зб. наук. праць НАУ, 2002. — С. 290–293.
5. Zaltzman A. Evolution of the potato fluidized bed medium separator/A. Zaltzman, Z. Schmilovitch//Conference Paper) American Society of Agricultural Engineers, 1985. — 27 p.
6. Ichiki H. Stone-clod separation and its application to potato cultivation in Hokkaido/H. Ichiki, Van N. Nguyen, K. Yoshinaga//Bio-oriented

Technology Research Advancement Institution, Engineering in Agriculture, Environment and Food. — 2013. — V. 6. — Iss. 2. — P. 77–85.

7. Karwowski T. Teoria i konstrukcja maszyny rolniczych/T. Karwowski. — Warszawa: PWRiL, 1982. — Т. 3. — 429 p.

8. Бутенин Н.В. Курс теоретической механики/Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. — М.: Наука, 1985. — Т. 2. — 496 с.

9. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах/ М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. — М.: Наука, 1964. — Т. 2. — 664 с.

10. Gieck K. Technische Formelsammlung/K. Gieck, R. Gieck. — Germering: Gieck Verlag, 1995. — 330 p.

11. Бышов Н.В. Совершенствование технологического процесса картофелеуборочных машин/Н.В. Бышов, Ю.В. Буряков, И.А. Успенский// Сб. науч. тр. сотруд. и аспиранта. — Рязань: РГСХА, 1996. — Т. 2. — С. 157–159.

12. Теорія відбивання бульб картоплі під час роботи спірального сепаратора/В.М. Булгаков, В.В. Адамчук, І.В. Головач та ін.//Вісн. аграр. науки. — 2017. — № 11. — С. 45–50.

Надійшла 17.11.2017.