

**Грушецький С. М.**

к.т.н., доцент

**Подільський державний
аграрно-технічний
університет****Яропуд В. М.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Hrushetskiy S.****State Agrarian and
Engineering University in
Podilia****Yaropud V.****Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 697.921.4****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-3-9****МОДЕЛЮВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ВІДРІЗАННЯ КАРТОПЛЯНОГО
ВОРОХУ ЛЕЗОМ ЛЕМІША**

Для успішного виходу України на західні ринки необхідно забезпечити конкурентоспроможність власної продукції, яка досягається при комплексній механізації технологічних процесів, зниженні витрат праці, збільшенні врожайності та якості одержуваної продукції.

Найбільш поширеним способом механізованого збирання картоплі є підкопування бульбоносного пласта з подальшим його руйнуванням і виділенням бульб з вороху, який містить в собі рослинні домішки, ґрунтові грудки і каміння. Найбільшим важким представляється відокремлення від бульб міцних ґрунтових грудок і каміння. Були спроби відійти від цієї проблеми шляхом розміщення картоплі на добре просіяних піщаних ґрунтах, за допомогою спеціальних агротехнічних прийомів, що знижують, до певної міри, кількість грудок. Однак такі заходи носять локальний характер, недостатньо надійні і суттєво ускладнюють технологію. Близько 25% площ, зайнятих під картоплею, сильно засмічені камінням, розміри яких близькі до розмірів бульб, а приблизно 40% посадженої картоплі, розміщені на ґрунтах, схильних до значного грудкоутворення.

Відповідно, метою дослідження було проведення порівняльного аналізу технологій і машин для збирання картоплі, розробка моделі відрізання картопляного вороху лезом леміша.

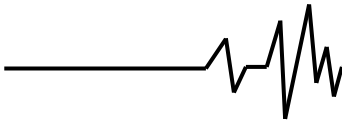
Дослідження проводилися шляхом технологічно-конструкційного аналізу технологій і машин для збирання картоплі. У процесі досліджень використовувались методи порівняння та математичного моделювання технологічних процесів. Інформаційною базою досліджень слугували праці українських та зарубіжних науковців з технологій і машин для збирання картоплі.

На основі проведеного порівняльного аналізу технологій і машин для збирання картоплі виявлено основні процеси, що впливають на агротехнічні показники збиральної техніки, розроблено модель відрізання картопляного вороху лезом леміша та інших конструктивних та кінематичних параметрів робочих органів леза леміша.

Ключові слова: модель відрізання картопляного вороху, картопля, картоплезбиральна техніка, технологія, збирання картоплі.

Постановка проблеми. Урядом України обрано стратегічний курс на розвиток в аграрно-індустріальному напрямі. Україна має унікальний природний потенціал, що дозволяє стати лідером з виробництва

сільськогосподарської продукції в Європі. Проте, для успішного виходу на західні ринки необхідно забезпечити перш за все конкурентоспроможність власної продукції, яка досягається при комплексній механізації



технологічних процесів, зниженні витрат праці, збільшенні врожайності та якості одержуваної продукції [1]. Вирощування картоплі в країні здійснюється за технологіями минулого століття, і якщо раніше вирощування картоплі було механізованим, то на сьогодні в більшості господарств вона вирощується вручну. З проведенням реформ на селі картоплярство розсіялося по малих селянських, фермерських та садово-городніх ділянках, де розміщено близько 95% цієї культури.

Машина для вирощування картоплі в Україну завозились і завозяться, в основному, з Білорусі та Німеччини [2]. Загальновідомо, що техніка на 70-80% морально застаріла, перебуває не в найкращому стані і потребує суттєвого оновлення. Картоплярі часто беруть за приклад сусідню Білорусь, де технологічний цикл повністю забезпечений державою та працюють відповідні заводи.

Технопарк картоплярства України, в свою чергу, актуалізує. Проблем удосконалення існуючих та винайдення нових перспективних технологій і робочих органів картоплезбиральної техніки, обґрунтування оптимальних режимів їх роботи і, в кінцевому рахунку, забезпечення цієї галузі рослинництва сучасною, високопродуктивною і надійною збиральною технікою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі вирощування та збирання картоплі присвячено чимало друкованих праць. Проблемами картопляної галузі займалися і займаються такі вчені, як Грушецький С.М., Гуцол Т.Д., Булгаков В.М., Смолінський С.В. та ін. [3-11].

Явищем та моделювання процесу сепарації картопляного вороху займався у своїх працях Фірман Ю.П. [5].

Питаннями розробки та обґрунтування параметрів ротацийного картоплекопача займався Бончик В.С. [7].

Останніми дослідженнями слід вважати науковий пошук і обґрунтування конструкції і параметрів спірального сепаратора картопляного вороху та обґрунтування параметрів поздовжніх транспортерів-сепараторів коренезбиральних машин присвячено дослідження Булгакова В.М. Смолінського С.В., Фльонц І.В. та ін. [8, 11].

Великим вкладом в теорію лемішно-полицевої поверхні стали праці Л.В. Гячева, який у ряді своїх праць розглянув математичні основи цього процесу, Г.Д. Петров провів дослідження по визначенню розмірної характеристики ґрунтових грудок, що утворюються при підкопуванні бульбоносного шару [12].

Стратегічні питання з вирощування картоплі в Україні з використанням

найсучасніших технологій і техніки, які б мали конкурентоспроможні якісні показники, дослідники у своїх працях, на жаль, оминають аналіз сучасного стану картоплярства в Україні є завжди актуальною проблемою.

Формулювання мети досліджень.

Метою дослідження є моделювання відрізання картопляного вороху лезом леміша.

Виклад основного матеріалу дослідження. Очевидно, що і процес руху часток і перемішування вороху, руйнування грудок ґрунту і просіювання дрібних частинок залежать від розподілу фракцій ґрунту по товщині вороху. Виходячи з цього, можна побудувати розгорнуту модель процесу руху часток вороху по лемішно-полицевій поверхні і сепарації картопляного вороху.

Для обґрунтування такої математичної моделі слід розглянути спочатку всі складові незалежно одна від одної, а потім перейти від часткового до загального – об'єднати окремі впливи в кінцеву модель процесу руху часток вороху по лемішно-полицевій поверхні і сепарації картопляного вороху.

Процес переміщення леза леміша картоплезбиральної машини є неперервне різання, при якому однакові сили, що діють у відповідних точках леза, відповідають рівній швидкості руху частинок ґрунту. При цьому факторами, що впливають на величину опору, є вид і стан ґрунту, швидкість деформації, розміри леза (величина місцевої деформації).

Лезо леміша картоплезбиральної машини, рухаючись в ґрунті, виконує місцеву деформацію зминання ґрунту шляхом руйнування зв'язків між його частинами. Цей процес носить характер переміщення твердих частинок ґрунту між нерухомі частинки, що оточують їх. Сили опору переміщень частинок є силами «внутрішнього» тертя між ними і при відомому русі направлені в напрямку, протилежному відносній швидкості рухомих частинок.

Розглядаючи рух леза з малою швидкістю і нехтуючи силами інерції частинок у процесі їхнього ковзання по лезу, прийдемо до висновку, що сила опору середовища руху частинки зрівноважується силою тиску поверхні на частинку. У цьому випадку реакція поверхні збігається по напрямку з абсолютною швидкістю частки.

Найбільша швидкість леза, при якій розроблена на цій основі теорія, дасть достатню для практичних цілей точність результатів, залежить від стану картопляного вороху і повинна бути встановлена дослідним шляхом. Ця точність буде, тим вища, чим більша сила опору середовища руху частинки, тому що в цьому випадку сила інерції буде відносно меншою.



З огляду на викладене, при дослідженні руху леза у картопляному вороху допустимо, що:

а) відносні швидкості частки до і після зіткнення з лезом лежать в одній площині з нормаллю до поверхні, удар частинки об поверхню вважаємо абсолютно непружним (коефіцієнт відновлення дорівнює нулю);

б) сила опору переміщенню частинки в просторі між навколишніми нерухомими частками протилежна по напрямку вектору її абсолютної швидкості;

в) реакція поверхні, прикладена до частинки, збігається по напрямку з абсолютною швидкістю частинки;

г) сила опору переміщенню групи частинок, що заповнюють майданчик dF , пропорційна величині площі поверхні леза.

Зусилля, що діє на ворох з боку якої-небудь елементарної площі поверхні леза, можна підрозділити на статичне, що витрачається на деформацію ґрунту, (руйнування зв'язків між частинками, відносно переміщення часток) і динамічне надання швидкості частинкам.

Зусилля, що витрачаються на переміщення часток вороху

Якщо ворох розглядати як тіло сипуче, між частками якого існує сухе тертя, то властивості такого вороху можна охарактеризувати величиною нормального тиску [12]:

$$\sigma = k = \frac{dp}{dF_n},$$

при якому починається переміщення часток, що стикаються з поверхнею леза, відносно нерухомих часток. Сили сухого тертя між частками, у свою чергу, пропорційні статичному тиску в даній точці обсягу, тобто товщині h_k шару вороху над лезом і питомою вагою γ ґрунту

$$k = k_0 \gamma h_k,$$

де k_0 – постійна, що характеризує фракційні властивості середовища, що розрізається.

Оскільки лезо при різанні розсовує частинки вороху, сили тертя між ними у всіх точках поверхні леза досягають граничних значень. Зневажаючи товщиною горизонтально розташованого леза (тобто, вважаючи для всіх точок поверхні леза $h_k = \text{const}$), можна розглядати нормальні напруги середовища у всіх точках при русі леза постійними; силами

інерції часток при ковзанні по лезу ми, як показано раніше, зневажаємо, вважаючи швидкість різання малою.

З огляду на викладене, позначимо через $d\bar{p}_1$ – зусилля розсовування частинок, що відповідає елементарній площі dF поверхні леза (зусилля $d\bar{p}_1$ відхилене від нормалі до елементарної площі поверхні леза на кут тертя; $f = tg\varphi$ – коефіцієнт тертя вороху по поверхні леза; \bar{v}_0 – одиничний вектор абсолютної швидкості частки.

Між зазначеними величинами, мабуть, існує залежність для лівого і правого леза

$$\begin{aligned} d\bar{p}_{l1} &= k_l \sin \varphi dF \\ d\bar{p}_{n1} &= k_n \cos \varphi dF \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Тут } k_l = \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \frac{dp_l}{dF}, k_n = \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{dp_n}{dF}$$

– максимальна нормальна напруга, при якій починається відносно переміщення часток по лівому і правому лезу.

Проекції сили $d\bar{p}_1$ на напрямки нормалі \bar{n}_0 до поверхні і дотичної \bar{t}_0 до відносної траєкторії рівні:

$$\begin{aligned} dp_{l1}^n &= k_l dF \sin^2 \varphi; \\ dp_{n1}^n &= k_n dF \cos^2 \varphi; \\ dp_{l1}^t &= k_l dF \cos \varphi \sin \varphi; \\ dp_{n1}^t &= k_n dF \sin \varphi \cos \varphi; \end{aligned} \quad (a)$$

де сила dp_1^t представляє собою елементарну силу тертя.

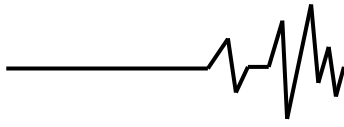
При ширині захвату корпусу, рівній B для циліндричного леміша довжина l леза буде

$$\text{(рис. 1): } AB = l = \frac{B}{2 \sin \gamma_0}, \text{ а крива леза за}$$

умови рівності $A_1B_1 = AD$ матиме вираз:

$$R_2 \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 \right) = \frac{l}{\sin \gamma_0}.$$

Звідси



$$R_2 = \frac{l}{\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_0\right) \sin \gamma_0}$$

Так, підставивши значення у формули, дістанемо: $l = 0,290$ м, $R_2 = 0,303$ м.

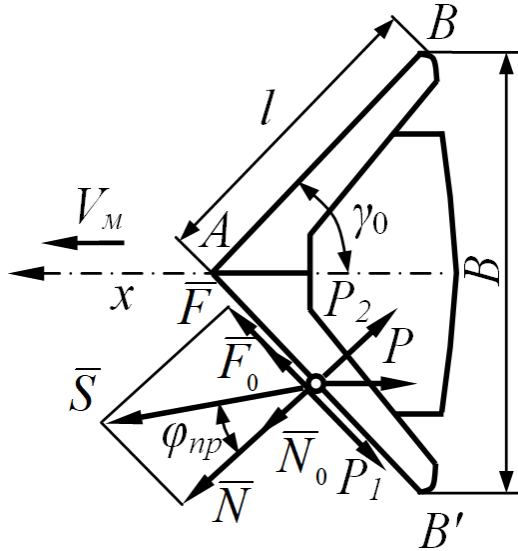


Рис. 1. Схема пасивного циліндричного леміша

Тоді елемент площі лівої і правої поверхні леза леміша виразиться в такий спосіб:

$$dF = \frac{B}{\sin \gamma_0 \cos \gamma_0} \rho(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$\left. \begin{aligned} dp_{n1}^n &= k_n B \frac{\sin^2 \varphi}{2 \cos \gamma_1} \rho(\varepsilon) d\varepsilon, & dp_{n1}^n &= k_n B \frac{\cos^2 \varphi}{2 \sin \gamma_1} \rho(\varepsilon) d\varepsilon; \\ dp_{n1}^t &= k_n B \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{2 \cos \gamma_1} \rho(\varepsilon) d\varepsilon, & dp_{n1}^t &= k_n B \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{2 \sin \gamma_1} \rho(\varepsilon) d\varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Проекції сили $d\bar{p}_1$ на напрямки нормалі \bar{N}_0 до леза, що лежить у площині дна борозни, утворюють леза \bar{F}_0 (рис. 1).

$$\left. \begin{aligned} dN_{n1} &= dp_{n1}^n \cos \varepsilon + dp_{n1}^t \cos \eta \sin \varepsilon, & dN_{n1} &= dp_{n1}^n \sin \varepsilon + dp_{n1}^t \sin \eta \cos \varepsilon; \\ dF_n &= dp_{n1}^t \sin \eta, & dF_n &= dp_{n1}^t \cos \eta. \end{aligned} \right\}$$

З метою самоочищення леза леміша кут скосу γ_0 вибирають за умови ковзання скиби з підкопаним кущем бульб по лезу [12].

Зусилля P від дії підкопаного вороху на лезо леміша розкладемо на складові P_1 і P_2 :

$$P_1 = P \cos \gamma_0. \quad (2)$$

$$P_2 = P \sin \gamma_0 = \bar{N}, \quad (3)$$

де \bar{N} – нормальна сила.

Сила тертя \bar{F} спрямована в протилежний бік від сили P_1 . Ворох ковзається по лезу за умови $P_1 > \bar{F}$ або

$$P \cos \gamma_0 > \bar{N} \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

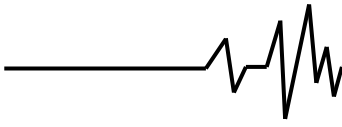
де φ – кут тертя ковзання вороху по лезу леміша.

Підставивши значення нормальної сили \bar{N} (3), після перетворень отримаємо:

$$\operatorname{ctg} \gamma_0 > \operatorname{tg} \varphi, \text{ або } \gamma_0 < \frac{\pi}{2} - \varphi. \quad (5)$$

Проте зі зменшенням кута γ_0 збільшується довжина леміша l_n , що негативно впливає на сповзання скиби з його поверхні і збільшує тяговий опір. Тому в існуючих конструкціях кут скосу становить $40 \dots 50^\circ$ [12].

Підставивши знайдене значення елемента площі dF у формулу (а), одержимо:



Підставляючи в ці формули значення dp_1^n і dp_1^t з (6) і кута η $tg \eta = tg \gamma_1 \cos \varepsilon$, інтегруючи отримані вирази в межах від ε_1 до $\pi/2$ і подвоюючи (для двох симетричних

половин леза), знайдемо чисельні значення складових \bar{N} і \bar{F} повного зусилля \bar{S} різання (рис. 1):

$$N_{n1} = k_n B \frac{\sin^2 \varphi}{\cos \gamma_1} \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \left(\cos \varepsilon + f \cos \gamma_1 \frac{\sin^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} \right) \rho(\varepsilon) d\varepsilon;$$

$$N_{t1} = k_n B \frac{\cos^2 \varphi}{\sin \gamma_1} \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \left(\sin \varepsilon + f \sin \gamma_1 \frac{\cos^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \varepsilon}} \right) \rho(\varepsilon) d\varepsilon;$$

$$F_{n1} = k_n B \frac{\cos \varphi}{tg \gamma_1} \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} d\varepsilon; \quad F_{t1} = k_n B \frac{\sin \varphi}{tg \gamma_1} \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon. \quad (6)$$

Розділивши силу F_1 на N_1 , знайдемо тангенс кута φ_1 складеного зусиллям \bar{S} з

нормаллю \bar{N}_0 до леза (приведений коефіцієнт тертя леза по вороху):

$$f_{n1} = tg \varphi_1 \frac{F_{n1}}{N_{n1}} = f \sin \gamma_1 \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\rho(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \left(\cos \varepsilon + f \cos \gamma_1 \frac{\sin^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} \right) \rho(\varepsilon) d\varepsilon}. \quad (7)$$

З формули (6) видно, що зусилля F_1 і N_1 залежать від параметрів леза: кута ε_1 і γ_1 ширини захвату B , форми і розмірів кривої ортогонального перетину леза (виду рівняння $\rho = \rho(\varepsilon)$), а також від коефіцієнта тертя ґрунту по сталі f і властивостей ґрунту k . Приведений коефіцієнт тертя від розмірів леза і коефіцієнта не залежить.

Необхідно відзначити, що в тих випадках, коли на лезі існує область відсутності ковзання, формули (6) несправедливі. Сили тертя в області відсутності ковзання не досягають граничного значення ($dp_1 < f dp_1^n$). Складаючи сили тертя і нормальні тиски на поверхні леза, одержимо силу $F' < F$ і $N' \neq N$.

Однак при проектуванні лемешів умова

$$\frac{\cos \varphi}{\sin \gamma_1} > 1 \text{ або } \gamma_1 < 90^\circ - \varphi \text{ ковзан}$$

ня вороху по поверхні леза завжди виконується, тому стосовно леза леміша формули (6) справедливі.

Сили динамічного тиску леза на ворох. Застосуємо теорему про зміну кількості руху до маси dm вороху [12]:

$$dm(\bar{V} - \bar{V}_1) = d\bar{p}_2 \cdot dt,$$

де $d\bar{p}_2$ – сила швидкісного тиску, що діє на масу dm .

Так, як швидкість частки до зіткнення з лезом $\bar{V}_1 = 0$, то

$$d\bar{p}_2 = \frac{dm}{dt} \bar{V} \quad (8)$$

де \bar{V} – абсолютна швидкість частки після зіткнення з лезом;

$\frac{dm}{dt}$ – маса вороху, що надходить на

деяку площу dF поверхні леза за одиницю часу;



через малість площі dF величина є нескінченно малою.

Проекції сили $d\bar{p}_2$ на напрямки нормалі \bar{n}_0 до поверхні і дотичної \bar{t}_0 до відносної траєкторії будуть рівні:

$$dp_2^n = \frac{dm}{dt} V \cos \varphi, \quad dp_2^t = \frac{dm}{dt} V \sin \varphi.$$

Маса вороху, що надходить за час dt на площадку dF поверхні леза дорівнює:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\gamma_0}{g} V_e \sin \alpha dF. \quad (7)$$

Підставляючи у формули (в) значення $\frac{dm}{dt}$ з (7), $\sin \alpha = \sin \gamma_1 \sin \varepsilon$ і значення

$$N_{\lambda 2} = \frac{\gamma_0}{g} BV_e^2 \sin \gamma_1 \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \left(\cos \varepsilon + f \cos \gamma_1 \frac{\sin^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} \right) \rho(\varepsilon) \cos^2 \varepsilon d\varepsilon;$$

$$F_{\lambda 2} = f \frac{\gamma_0}{g} BV_e^2 \cos \gamma_1 \int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \varepsilon \rho(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} d\varepsilon. \quad (9)$$

Розділивши F_2 на N_2 , знайдемо приведений коефіцієнт тертя:

$$f_{\lambda 2} = tg \varphi_2 = f \sin \gamma_1 \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2 \varepsilon \rho(\varepsilon)}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_1}^{\frac{\pi}{2}} \left(\cos \varepsilon + f \cos \gamma_1 \frac{\sin^2 \varepsilon}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \varepsilon}} \right) \rho(\varepsilon) \cos^2 \varepsilon d\varepsilon}. \quad (10)$$

Таким чином, швидкісні зусилля F_2 і N_2 залежать від кутів ε_1 та γ_1 форми і розмірів кривої ортогонального перетину леза $\rho = \rho(\varepsilon)$, швидкості руху леза V_e і коефіцієнта тертя f ґрунту по матеріалу леза. Приведений коефіцієнт тертя не залежить від швидкості руху і розмірів леза.

Для плоского леза, у якого $\varepsilon_1 = 90^\circ$, приведений коефіцієнт тертя, обумовлений після формул (7) або (10), не залежить від γ_1 і дорівнює коефіцієнту тертя вороху по сталі f .

абсолютної швидкості $V = V_e \frac{\sin \gamma_1}{\cos \varphi} \sin \varepsilon$ з

$$V = V_e \frac{\sin \gamma_1}{\cos \varphi} \sin \varepsilon_1, \text{ одержимо:}$$

$$dp_{\lambda 2}^n = \frac{\gamma_0}{2g} BV_e^2 \cos \gamma_1 \cdot \cos^2 \varepsilon \rho(\varepsilon) d\varepsilon;$$

$$dp_{\lambda 2}^t = f \frac{\gamma_0}{2g} BV_e^2 \cos \gamma_1 \cdot \cos^2 \varepsilon \rho(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Проектуючи сили dp_2^n і dp_2^t на напрямки нормалі \bar{N}_0 , що утворює \bar{F}_0 леза,

інтегруючи ці вирази в межах від ε_1 до $\frac{\pi}{2}$ і

подвоюючи, знайдемо сили N_2 і F_2 :

При $\varepsilon_1 \rightarrow \pi/2$ чисельник і знаменник вираження для f_1 (або f_2) одночасно прагнуть до нуля, так як інтервал інтегрування $(\pi/2 - \varepsilon_1) \rightarrow 0$. Формули f_1 і f_2 стають невизначеностями вигляду $0/0$.

Для розкриття невизначеностей застосуємо правило Лопітала, розглядаючи інтеграл чисельника і знаменника як функції нижньої межі ε_1 . Диференціюючи ці функції по перемінно ε_1 , одержимо підінтегральні функції,



відношення яких при $\varepsilon_1 \rightarrow \pi/2$ прагне в обох випадках до $1/\cos \gamma_1$.

Отже, для плоского леза:

$$f_1 = f_2 = f.$$

Повну силу тертя, нормальний тиск і кут φ_{np} при різанні лезом сухого вороху знайдемо за формулами:

$$\left. \begin{aligned} F &= F_{n1} + F_{n2} + F_{t1} + F_{t2} = 2(F_{n1} + F_{t1}); \\ N &= N_{n1} + N_{n2} + N_{t1} + N_{t2} = 2(N_{n1} + N_{t1}); \\ f_{np} &= \operatorname{tg} \varphi_{np} = \frac{F_{t1} + F_{t2}}{N_{n1} + N_{n2}} = \frac{F_{t1} + F_{t2}}{N_{n1} + N_{n2}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Складові повного зусилля S різання по осі координат для симетричного леза рівні:

$$\left. \begin{aligned} S_x &= 2[(F_{n1} + F_{n2}) \sin \gamma_1 + (N_{n1} + N_{n2}) \cos \gamma_1]; \\ S_y &= 2[(F_{n1} + F_{n2}) \cos \gamma_1 - (N_{n1} + N_{n2}) \sin \gamma_1]; \\ S_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Теорія різання вороху лезом дозволяє підійти до дослідження (у першому наближенні) ряду сторін роботи леза. Так, після введення деяких допущень вона може бути застосована для дослідження явищ зносу леза (вивчення зміни форми леза при зносі, зміни опору при зносі леза, відшукування теоретичної граничної форми зношеного леза і т.п.). Однак це не входить до завдання даної роботи.

Висновки. У результаті аналізу математичної моделі відрізання картопляного вороху лезом леміша визначено раціональні параметри. На основі цих параметрів визначено раціональні значення параметрів та режими роботи лемішно-полицевої поверхні: знайдено чисельні значення складових \bar{N} і \bar{F} повного зусилля \bar{S} різання, повну силу тертя, нормальний тиск і кут φ_{np} при різанні лезом сухого вороху, складові повного зусилля S різання по осі координат для симетричного леза.

Список використаних джерел

1. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak, V.L. Kurylo V.M. Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59. № 3. pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11.
2. Грушецький С.М., Рудь А.В., Семенишина І.В., Медведєв Є.П. The technological process pattern of potato root harvester. *Журнал «Подільський вісник: сільське*

господарство, техніка, економіка». № 31. Кам'янець-Подільський. 2019. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2019-2-7>.

3. Грушецький С.Н. Модель технологических процессов картофелеуборочных машин. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции (24-25 октября 2019 года)*. В 2 ч.. Минск : БГАТУ. 2019. Ч. 1. С. 125-127.

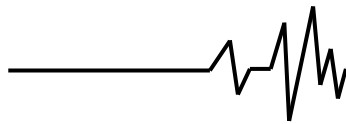
4. Грушецький С.М., Підлісний В.В. Аналіз конструкцій та результати досліджень сепараторів картопляного вороху. *Сучасний рух науки: тези доп. VI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції журналу «WayScience»*. 4-5 квітня 2019 р. Дніпро, 2019. С. 274-282.

5. Фирман Ю.П., Грушецький С.Н. Кинематический анализ работы динамического ленточного сепаратора. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol. 17. № 1. P. 11-16.

6. Hutsol Taras, Firman Jurii, Komarnitsky Sergiy. Modelling of the separation process of the potato stack. *Agricultural Engineering : czasopismo*. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej. 2017. Vol. 21, № 4. P. 27-35.

7. Бончик В.С., Федирко П.П. Результаты экспериментальных исследований геометрических параметров картофельной грядки при работе картофелеуборочных машин. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol. 17. № 5. pp. 3-6.

8. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z. and Olt J. Theory of impact



interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*. 2018. 16(1). pp. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037. <https://doi.org/10.15159/AR.18.037>.

9. Булгаков В.М., Пилипака С.Ф., Захарова Т.Н., Калетник Г.М., Яропуд В.М. Плоскі вертикальні криві, які забезпечують постійні тиск і швидкість руху матеріальної точки. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. ВНАУ. 2014 р. Вип. 1 (73). С. 5-12.

10. Aliev E., Bandura V., Pryshliak V., Yaropud V., Trukhanska O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural. *INMATEH - Agricultural Engineering*. vol. 54, no.1. 2018. P. 95-104.

11. Pascuzzi S., Bulgakov V., Santoro F., Sotirios A., Anifantis, Olt J., Nikolaenko S. Theoretical study on sieving of potato heap elements in spiral separator. *Agronomy Research*. 2019. 17(1), P. 33-48. DOI: 10.15159/AR.19.073. <https://doi.org/10.15159/AR.19.073>.

12. Петров Г.Д. Картофелеуборочные машины. *Машиностроение*. 1984. 320 с.

13. Токар А.М. Теоретична механіка. Кінематика: Методи і задачі. *Навчальний посібник*. Либідь, 2001. 416 с.

References

1. Hrushetskiy S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak, V.L. Kurylo V.M. (2019). Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. Vol. 59. № 3. pp. 101-110. DOI: 10.35633/INMATEH-59-11. [in English].

2. Hrushetskiy S.M., Rud A.V., Semenyshyna I.V., Medvedev YE.P. (2019). The technological process pattern of potato root harvester [The technological process pattern of potato root harvester]. *Zhurnal «Podil's'kyi visnyk: sil's'ke hospodarstvo, tekhnika, ekonomika»*. № 31. Kam"yanets'-Podil's'kyi. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2019-2-7>. [in English].

3. Hrushetskiy S.N. (2019). Model' tekhnolohycheskykh protsessov kartofeleuborochnykh mashyn [Model of technological processes of potato harvesting machines]. *Tekhnicheskoe y kadrovoe obespechenye ynnovatsyonnykh tekhnolohyy v sel'skom khozyaystve: materyaly Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy (24-25 oktyabrya 2019 hoda)*. V 2 ch.. Mynsk : BHATU. 2019. CH. 1. S. 125-127. [in Russian].

4. Hrushetskiy S.M., Pidlisnyy V.V. (2019). Analiz konstruktsiy ta rezul'taty doslidzhen' separatoriv kartoplyanoho vorokhu [Analysis of

designs and research results of potato pile separators]. *Suchasnyy rukh nauky: tezy dop. VI mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi internet-konferentsiyi zhurnalu «WayScience»*. 4-5 kvitnya 2019. Dnipro. pp. 274-282. [in Ukrainian].

5. Fyrman YU.P., Hrushetskiy S.N. (2015). Kynematycheskyy analiz raboty dynamycheskoho lentochnoho separatora [Kinematic analysis of the operation of a dynamic belt separator]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. № 1. pp. 11-16. [in Russian].

6. Hutsol Taras, Firman Jurii, Komarnitsky Sergiy. (2017). Modelling of the separation process of the potato stack. *Agricultural Engineering : czasopismo. Polskie Towarzystwo Inzynierii Rolniczej*. Vol. 21, № 4. pp. 27-35. [in English].

7. Bonchik V.S., Fedirko P.P. (2015). Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy geometricheskikh parametrov kartofel'noy gryadki pri rabote kartofeleuborochnykh mashin [The results of experimental studies of the geometric parameters of the potato beds during the work of potato harvesters]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. № 5. pp. 3-6. [in Russian].

8. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z. and Olt J. (2018). Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*. 16(1). pp. 52-63. DOI: 10.15159/AR.18.037. <https://doi.org/10.15159/AR.18.037>. [in English].

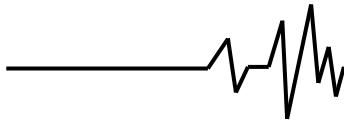
9. Bulhakov V.M., Pylypaka S.F., Zakharova T.N., Kaletnik H.M., Yaropud V.M. (2014). Ploski vertykal'ni kryvi, yaki zabezpechuyut' postiyini tysk i shvydkist' rukhu material'noyi tochky [Flat vertical curves that provide constant pressure and velocity of material point]. *Vseukrayins'kyi nauково-tekhnichnyy zhurnal «Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh»*. VNAU. Vyp. 1 (73). S. 5-12. [in Ukrainian].

10. Aliev E., Bandura V., Pryshliak V., Yaropud V., Trukhanska O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural [Modeling of mechanical and technological processes of agricultural]. *INMATEH - Agricultural Engineering*. vol. 54, no.1. pp. 95-104. [in English].

11. Pascuzzi S., Bulgakov V., Santoro F., Sotirios A., Anifantis, Olt J., Nikolaenko S. (2019). Theoretical study on sieving of potato heap elements in spiral separator. *Agronomy Research*. 17(1), P. 33-48. DOI: 10.15159/AR.19.073. <https://doi.org/10.15159/AR.19.073>. [in English].

12. Petrov G.D. (1984). Kartofeleuborochnyye mashyny [Potato harvesting machines]. *Engineering*. 320 p. [in Russian].

13. Tokar A.M. (2001). Theoretical mechanics. Kinematics: Methods and Problems



[Theoretical mechanics. Kinematics: Methods and Tasks]. *Tutorial*. Libid. 416 p. [in Ukrainian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТРЕЗАНИЯ КАРТОФЕЛЬНОГО ВОРОХА ЛЕЗВИЕМ ЛЕМЕХА

Для успешного выхода Украины на западные рынки необходимо обеспечить конкурентоспособность своей продукции, что достигается при комплексной механизации технологических процессов, снижении затрат труда, увеличении урожайности и качества получаемой продукции.

Наиболее распространенным способом механизированной уборки картофеля является подкапывания клубненосный пласта с последующим его разрушением и выделением клубней с вороха, который содержит в себе растительные примеси, грунтовые грудки и камни. Наибольшим тяжелым представляется отделения от клубней крепких грунтовых комков и камней. Были попытки отойти от этой проблемы путем размещения картофеля на хорошо просеянного песчаных почвах, с помощью специальных агротехнических приемов, снижающих, в известной степени, количество комков. Однако такие меры носят локальный характер, недостаточно надежные и существенно усложняют технологию. Около 25% площадей, занятых под картофелем, сильно засорены камнями, размеры которых близки к размерам клубней, а примерно 40% посаженной картошки, размещенные на почвах, подверженных значительному комкообразованию.

Соответственно, целью исследования было проведение сравнительного анализа технологий и машин для уборки картофеля, разработка модели отрезка картофельного вороха лезвием лемеха.

Исследования проводились путем технологически конструкционного анализа технологий и машин для уборки картофеля. В процессе исследований использовались методы сравнения и математического моделирования технологических процессов. Информационной базой исследований послужили труды украинских и зарубежных ученых по технологиям и машин для уборки картофеля.

На основе проведенного сравнительного анализа технологий и машин для уборки картофеля выявлены основные процессы, влияющие на агротехнические показатели уборочной техники, разработана модель отрезка картофельного вороха лезвием лемеха и других конструктивных и кинематических параметров рабочих органов

лезвия лемеха.

Ключевые слова: модель отрезка картофельного вороха, картофель, картофелеуборочная техника, технология, уборки картофеля.

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF CUTTING POTATO BUILDING WITH A BLADE OF A LEMECH

For Ukraine's successful entry into Western markets, it is necessary to ensure the competitiveness of its own products, which is achieved through comprehensive mechanization of technological processes, reducing labor costs, increasing yields and quality of products.

The most common method of mechanized potato harvesting is undermining the tuber layer with its subsequent destruction and separation of tubers from the heap, which contains plant impurities, soil lumps and stones. The most difficult is the separation from the tubers of strong soil lumps and stones. Attempts have been made to overcome this problem by placing potatoes on well-sifted sandy soils, using special agronomic techniques that reduce, to some extent, the number of lumps. However, such measures are local in nature, not reliable enough and significantly complicate the technology. About 25% of the area occupied by potatoes is heavily littered with stones, the size of which is close to the size of tubers, and about 40% of planted potatoes are placed on soils prone to significant lump formation.

Accordingly, the aim of the study was to conduct a comparative analysis of technologies and machines for harvesting potatoes, to develop a model for cutting a potato heap with a ploughshare blade.

The research was carried out by technological and structural analysis of technologies and machines for harvesting potatoes. In the process of research methods of comparison and mathematical modeling of technological processes were used. The information base of the research was the work of Ukrainian and foreign scientists on technologies and machines for potato harvesting.

On the basis of the comparative analysis of technologies and machines for potato harvesting the main processes influencing agrotechnical indicators of harvesting equipment are revealed, the model of cutting of a potato heap by a ploughshare blade and other constructive and kinematic parameters of working bodies of a ploughshare blade is developed.

Key words: potato heap cutting model, potatoes, potato harvesting equipment, technology, potato harvesting.

**Відомості про авторів**

Грушецький Сергій Миколайович - кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету (вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com).

Яропуд Віталій Миколайович - кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).

Грушецкий Сергей Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры агроинженерии и системотехники Подольского государственного аграрно-технического университета (ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Хмельницкая обл., 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com).

Яропуд Виталий Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).

Hrushetskiy Sergiy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and System Engineering Podilsky State Agrarian and Technical University (St. Shevchenko, 13, Kamianets-Podilsky, Khmelnytsky region, 32316, e-mail: g.sergiy.1969@gmail.com).

Yaropud Vitaliy - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com).