



Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-2



**Machinery  
Energetics  
Transport  
of Agribusiness**



**ТЕХНІКА  
ЕНЕРГЕТИКА  
ТРАНСПОРТ АПК**



**ТЕХНІКА,  
ЕНЕРГЕТИКА,  
ТРАНСПОРТ АПК**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування  
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

---

---

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».  
Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.  
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації  
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

---

---

*Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Токарчук О.А. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2020. 2 (109) . 146 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол №1 від 27.08.2020 р.)*

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.*

*Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 року №886)*

---

---

**Головний редактор**

**Токарчук О.А.** – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

**Заступник головного редактора**

**Веселовська Н.Р.** – д.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

**Відповідальний секретар**

**Полевода Ю.А.** – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

**Члени редакційної колегії**

**Іскович – Лотоцький Р.Д.** – д.т.н., проф., Вінницький національний технічний університет

**Цуркан О.В.** – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

**Булгаков В.М.** – д.т.н., проф., академік НААН, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Іванчук Я.В.** – к.т.н., доц., Вінницький національний технічний університет

**Бандура В.М.** – к.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

**Зарубіжні члени редакційної колегії**

**Йордан Максимов** – д.т.н., професор Технічного університету Габрово (Болгарія)

---

---

Відповідальний секретар редакції **Полевода Ю.А.** кандидат технічних наук, доцент  
Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет, тел. 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: [pophv@ukr.net](mailto:pophv@ukr.net)



## ЗМІСТ

**I. МАШИНОВИКОРИСТАННЯ У РОСЛИННИЦТВІ ТА ТВАРИННИЦТВІ***Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Яропуд В.М., Малегін Р.Д.*

<b>ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ НА КОРМОВІ ЦІЛІ.....</b>	<b>5</b>
--	----------

*Бабин І. А., Гришун А. В.*

<b>ТЕОРЕТИЧНІ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЕЯКИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОЇЛЬНОГО АПАРАТУ З КЕРОВАНИМ РЕЖИМОМ ДОЇННЯ.....</b>	<b>16</b>
---	-----------

*Грушецький С.М., Яропуд В.М.*

<b>МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ КАРТОПЛЯНОГО ВОРОХУ В БАРАБАННОМУ СЕПАРАТОРІ.....</b>	<b>27</b>
---	-----------

*Kurilo Vasily, Pryshlyak Viktor*

<b>JUSTIFICATION OF THE METHOD AND DEVICE FOR TREATMENT AND SOWING OF SUGAR BEETS AND THE APPLICATION OF THE RESULTS IN PREPARATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>42</b>
---	-----------

*Малаков О.І., Бурлака С. А., Єленич А.П.*

<b>ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЗМУ ПЛЮЩЕННЯ РОСЛИННОЇ МАСИ КОСАРКИ-ПЛЮЩИЛКИ ПРИЧІПНОЇ КПП-4,2.....</b>	<b>48</b>
---	-----------

**II. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ***Комаха В.П., Єленич А. П.*

<b>НАПРЯМОК ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ В СКЛАДІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ.....</b>	<b>57</b>
--	-----------

*Мутко Микола*

<b>METHODOLOGICAL BASES FOR IMPROVING THE STRUCTURE OF PRODUCTION SUBDIVISIONS OF MOTOR TRANSPORT ENTERPRISES.....</b>	<b>64</b>
--	-----------

*Холодюк О.В.*

<b>ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ТА ЇХ РОЛЬ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА.....</b>	<b>71</b>
---	-----------

**III. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ***Ivan Sevostianov, Svetlana Kravets, Maryna Pidlypna*

<b>USE OF CRITERIAL SYNTHESIS AND ANALYSIS FOR MODERNIZATION OF OBJECTS OF MACHINE BUILDING PRODUCTION.....</b>	<b>88</b>
---	-----------

*Кондратюк Д.Г., Дмитренко В.П.*

<b>ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ТА ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУДЕРА З ПРУЖНИМ ГВИНТОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ НА ІНДЕКС РОЗШИРЕННЯ ЕКСТРУДАТУ.....</b>	<b>97</b>
---	-----------

**IV. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Гайдамак О.Л., Матвійчук В.А., Кучеренко Ю.С.*

<b>ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ.....</b>	<b>105</b>
--	------------

*Токарчук О. А., Полева Ю.А.*

<b>ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВИХ ТИПІВ МУФТ.....</b>	<b>113</b>
--	------------



**V. ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ**

*Возняк О.М., Штуць А.А.*

**РОЗРАХУНОК НЕСТАНДАРТНИХ W-ПАРАМЕТРІВ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ..... 122**

*Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г.*

**МЕТОД ТА ЗАСІБ ПРЯМОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН..... 128**

*Пазюк В. М.*

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ..... 138**



УДК 697.921.4

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-2-3

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ КАРТОПЛЯНОГО ВОРОХУ В БАРАБАННОМУ СЕПАРАТОРІ

**Грушецький Сергій Миколайович**, к.т.н., доцент  
Подільський державний аграрно-технічний університет  
**Яропуд Віталій Миколайович**, к.т.н., доцент  
Вінницький національний аграрний університет

**Sergiy Hrushetskiy**, PhD, associate professor  
Podilsky State Agrarian and Technical University  
**Vitaliy Yaropud**, PhD, associate professor  
Vinnytsia National Agrarian University

*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 процесів сепарації картопляного вороху в барабанному сепараторі.*

*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 процесу сепарації картопляного вороху в барабанному сепараторі, яка включає такі основні процеси: модель просіювання прохідної фракції ґрунту з верхнього шару вороху; модель перемішування вороху; модель руйнування грудок ґрунту на сепараторі; модель кінематичного аналізу картопляного вороху в барабанному сепараторі; модель просіювання прохідної фракції ґрунту з нижнього шару вороху; модель пошкодження бульб та інших конструктивних та кінематичних параметрів робочих органів барабанного сепаратора.*

**Ключові слова:** модель процесу сепарації, картопля, картоплезбиральна техніка, технологія, процес сепарації, барабанний сепаратор, збирання картоплі, сепарація, ворох.

**Ф. 46. Рис. 11. Літ. 13.**

### 1. 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.

---

## 2. 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 ротаційного 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 сепарації на решетах сипучих матеріалів стали праці д.ф.-м.н. Е.А. Напомнящего, 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.

---

## 3. Мета досліджень

---

Метою дослідження є моделювання процесів сепарації картопляного вороху у барабанному сепараторі.

---

## 4. Результати дослідження

---

Моделювання процесів сепарації картопляного вороху в барабанному сепараторі включає такі основні процеси:

1. Моделювання просіювання прохідної фракції ґрунту з верхнього шару вороху;
2. Моделювання перемішування вороху;
3. Модель руйнування грудок ґрунту на сепараторі;
4. Кінематичний аналіз картопляного вороху в барабанному сепараторі;
5. Модель просіювання прохідної фракції ґрунту з нижнього шару вороху;
6. Моделювання пошкодження бульб.

### 1. Моделювання просіювання прохідної фракції ґрунту з верхнього шару вороху.

При русі картопляного вороху по лемішно-полицевій поверхні біля 60% маси складається з малих часток (розмірами, меншими в 2 рази і більше, ніж просвіт сепарувального решета). Згідно аналізу розташування зон міцності шарів у профілі картопляної грядки (рис. 1) дрібні частки ґрунту в основному знаходяться у верхній частині і частково у нижній після кришення корпусом лемішно-полицевої поверхні.

Після сходу картопляного вороху із запропонованої схеми лемішно-полицевої поверхні він повертається на кут до 180° і верхня частина дрібних частинок ґрунту потрапляє у нижню, яка падає на сепарувальний робочий орган барабанного типу, і з цього моменту відбувається процес сепарації (просіювання прохідної фракції ґрунту з верхнього шару вороху).

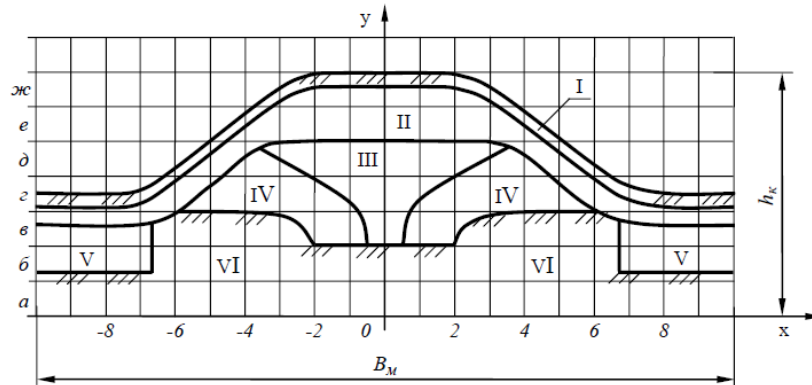


Рис. 1. Схема розташування зон міцності шарів у профілі картопляної грядки на середньосуглинковому ґрунті (за Н.М. Кандауловим) [12]:

умовні позначення:  $B_M$  – ширина міжряддя;  $h_K$  – глибина копання; I – поверхнева зона  $P_{руйн} = 12,0...19,0$  Н; II – пухка зона  $P_{руйн} = 5,0...8,0$  Н; III – перехідна зона  $P_{руйн} = 3,0...5,0$  Н; IV – щільна зона  $P_{руйн} = 6,0...14,0$  Н  $P_{max} = 28,0$  Н; V – зона міжрядь  $P_{руйн} = 8,0...10,0$  Н  $P_{max} = 11,0$  Н; VI – зона найбільшої щільності  $P_{руйн} = 50,0...60,0$  Н  $P_{серед} = 13,0...25,0$  Н.

Випадання часток із сепаратора можна уявити як випадковий процес з двох стадій: перша стадія – проходження часток скрізь пласт сипучого матеріалу (подія  $c$ ) і друга – проходження через отвори решета (подія  $n$ ). У цьому випадку ймовірність  $P(t)$  випадання частки з сепаратора за час  $t$  на основі теорії ймовірності виразиться як:

$$P(t) = P(c) \cdot P(n/c),$$

де  $P(c)$  – ймовірність опускання частки на поверхню решета;

$P(n/c)$  – ймовірність просіювання частки через поверхню решета за час  $t$ .

Уявимо собі одну дрібну частинку  $A$ , яка хаотично рухається серед інших часток суміші (рис. 2).

Користуючись рівнянням одновимірної дифузії [12], можна знайти ймовірність опускання частинки на поверхню пруткового решета через шар  $z_0$ :

$$P(z_0, t) = \int_0^t \frac{z}{\tau_0 \sqrt{2\pi B\tau_0}} \exp\left[-\frac{(z_0 - c\tau_0)^2}{2B\tau_0}\right] d\tau_0.$$

Після заміни  $z_0$  товщиною  $h$  і введення нової перемінної  $H = h\sqrt{2B\tau_0}$  знайдено вираз повноти виділення частинок із шару  $\varepsilon$ :  $\varepsilon = 1 - \Phi_1(H_1, \bar{n})$ . Тут функція  $\Phi_1(H_1, \bar{n})$  називається узагальненим інтегралом ймовірності:

$$\Phi_1(H_1, \bar{n}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^H \exp\left[-\left(x - \frac{n}{x}\right)^2\right] dx,$$

де  $B$  і  $c$  – стохастичні коефіцієнти;

$B$  – залежить від розмірів частинки і можливості середовища;

$c$  – пропорційна виразу  $1 - \rho_0/\rho$  ( $\rho$  – щільність середовища;  $\rho_0$  – щільність частки).

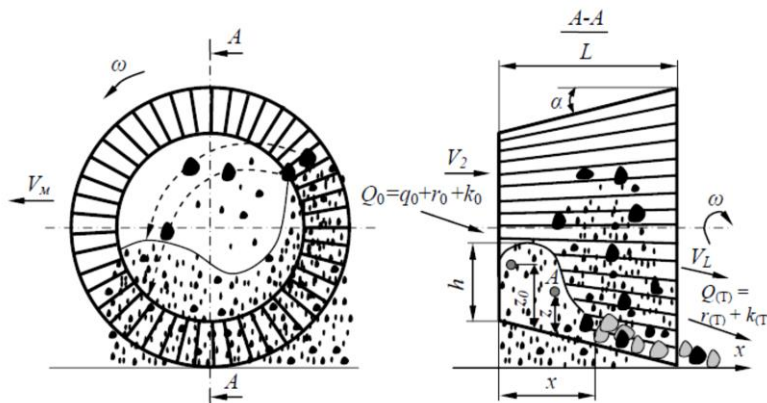
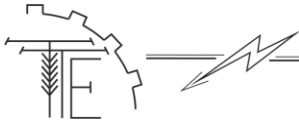


Рис. 2. Схема просіювання ґрунту



Із виразу імовірності просіювання частки через пруткове решето за час  $t$  може бути визначена повнота виділення  $\varepsilon$  для часток, які опускались на поверхню решета:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k\gamma(\delta-1)t}.$$

Ця нерівність називається рівнянням кінетики процесу. Позначивши  $1/[\gamma(\delta-1)]$  (де  $\tau_0$  – постійна часу процесу), маємо:

$$\varepsilon = 1 - e^{-t/\tau_0}.$$

Загальне рівняння процесу сепарації у скороченому вигляді:

$$\varepsilon = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{2Bt}}\right) [1 - e^{-t/\tau_0}]. \quad (1)$$

## 2. Моделювання перемішування вороху.

Імовірність моделі перемішування картопляного вороху сепаратором носить хаотичний рух.

Оскільки середовище ізотропне, то характер зміни всіх координат однаковий. Тому розглянемо лише одну координату частинки  $z(t)$  – випадковий процес в момент часу  $t$ .

Величину  $z(t) - z(0)$  можна навести у вигляді суми як завгодно великого числа малих однаково розподілених незалежних приростів:

$$z(t) - z(0) = \sum_{k=1}^n \left[ z\left(\frac{k}{n}t\right) - z\left(\frac{k-1}{n}t\right) \right]. \quad (2)$$

Тому, опираючись на центральну граничну теорему, можна зробити висновок, що  $z(t) - z(0)$  має нормальний розподіл. Як виявлено раніше, середнє значення цього нормального розподілу буде 0, а дисперсія –  $bt$ . Тобто, щільність розподілу величини  $z(t) - z(0)$  дорівнюватиме:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi bt}} e^{-\frac{z^2}{2bt}}. \quad (3)$$

Таким чином, ймовірність того, що за час  $\Delta t$  частинка з точки з координатою  $z_0$  переміститься в точку з координатами  $z$ , дорівнюватиме:

$$f(z_0, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b\Delta t}} e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2b\Delta t}}. \quad (4)$$

З урахуванням того, що рух частинок обмежується товщиною вороху, координати частинки не можуть бути меншими нуля (робоча поверхня сепаратора) і більшими  $h$  (змінна товщина шару вороху), рівняння (10) набуде наступного вигляду:

$$f(z_0, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b\Delta t}} \left( e^{-\frac{(z-z_0)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(z+z_0)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(z+z_0-2h)^2}{2b\Delta t}} \right). \quad (5)$$

Отримане рівняння подібне до одержаного Г.Д. Петровим [12].

У картопляному воросі можна виділити три основних компонента:

- дрібні частинки ґрунту;
- крупні частинки ґрунту, для просіювання яких необхідне попереднє їх подрібнення;
- бульби картоплі.

Позначимо відносну кількість перелічених компонентів відповідно через  $q$ ,  $r$  та  $k$ .

Тоді рівняння перемішування вороху набудуть вигляду (рис. 3):

$$q(z, t_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b\Delta t}} \int_0^h q(z, t_i) \left( e^{-\frac{(x-z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z-2h)^2}{2b\Delta t}} \right) dx, \quad (6)$$

де  $h$  – товщина шару вороху, м.

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t, \quad 0 \leq t_i \leq T,$$

де  $T$  – час сепарації.



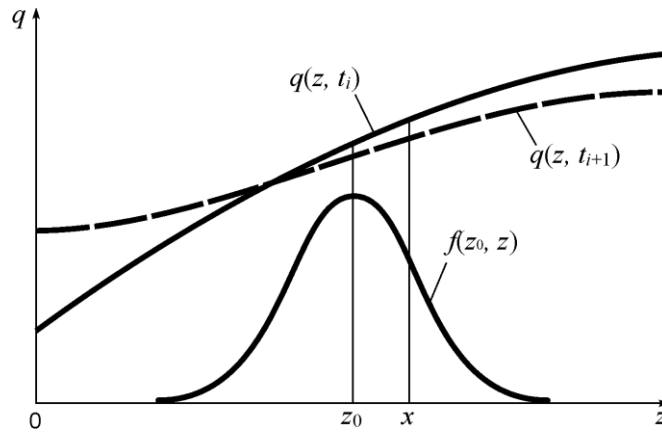
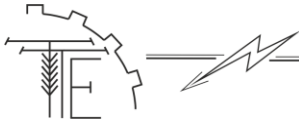


Рис. 3. Схема до визначення рівняння перемішування вороху

На рис. 4 наведено кінетику перемішування вороху для лінійної і нелінійної функції  $q(z, t_0)$ .

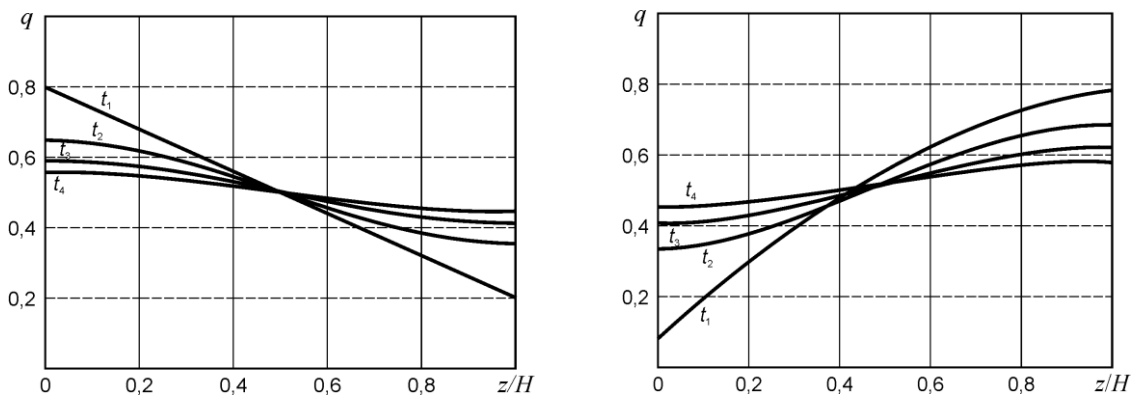


Рис. 4. Кінетика перемішування вороху

### 3. Модель руйнування грудок ґрунту на сепараторі.

Виявлено, що інтенсивність руйнування грудок із віддаленням від робочого органа зменшується за показниковим законом, тобто ступінь руйнування грудок можна записати як функцію від коефіцієнта активізації, часу сепарації та відстані від грудки до сепарувальної поверхні [12]:

$$\varepsilon = k_1 e^{-k_2 \cdot z \Delta t}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь руйнування грудок;

$k_1$  і  $k_2$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей грудок ґрунту;

$z$  – віддаль до робочого органу.

Коефіцієнт  $k_1$  характеризує здатність грудок ґрунту до руйнування, а коефіцієнт  $k_2$  – ступінь зниження інтенсивності впливу сепаратора на картопляний ворох із віддаленням від робочої поверхні.

Таким чином, математичну модель, яка наведена в попередньому підрозділі, можна доповнити з врахуванням руйнування грудок. Тоді залежність кількості зруйнованих грудок ґрунту запишеться наступним чином:

$$r(z, t_{i+1}) = r(z, t_i) \cdot (1 - k_1 e^{-k_2 \cdot z \Delta t}), \quad (8)$$

а рівняння перемішування вороху набудуть вигляду:

$$q(z, t_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b \Delta t}} \int_0^h q(z, t_i) \left( e^{-\frac{(x-z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z-2h)^2}{2b\Delta t}} \right) dx + r(z, t_i) (1 - k_1 e^{-k_2 \cdot z \Delta t}); \quad (9)$$

$$r(z, t_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b \Delta t}} \int_0^h r(z, t_i) \left( e^{-\frac{(x-z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z-2h)^2}{2b\Delta t}} \right) dx - r(z, t_i) (1 - k_1 e^{-k_2 \cdot z \Delta t}); \quad (10)$$



$$k(z, t_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b\Delta t}} \int_0^h k(z, t_i) \left( e^{-\frac{(x-z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z-2h)^2}{2b\Delta t}} \right) dx, \quad (11)$$

де  $q(z, t_i)$ ,  $r(z, t_i)$ ,  $k(z, t_i)$  – відносна кількість відповідно грудок ґрунту прохідної, непрохідної фракції та бульб картоплі на віддалі  $z$  від сепарувальної поверхні в момент часу  $t_i$ .

Припустивши, що в початковий момент часу  $t_0 = 0$  ворох однорідний, будуть справедливими наступні початкові умови:

$$q(z, t_0) = q_0; r(z, t_0) = r_0; k(z, t_0) = k_0, \quad (12)$$

де  $q_0, r_0, k_0$  – відповідно відносна кількість ґрунту прохідної, непрохідної фракції, а також бульб картоплі в початковий момент часу  $t_0$  (на початку сепарації).

На рис. 5 та 6 наведена кінетика процесу перемішування картопляного вороху з врахування подрібнення грудок.

#### 4. Кінематичний аналіз картопляного вороху в барабанному сепараторі.

Аналіз запропонованого сепарувального пристрою полягає в дослідженні кінематики часток ґрунтової суміші, які попадають в об'єм конусного сепаратора з подальшою оптимізацією його технологічних параметрів.

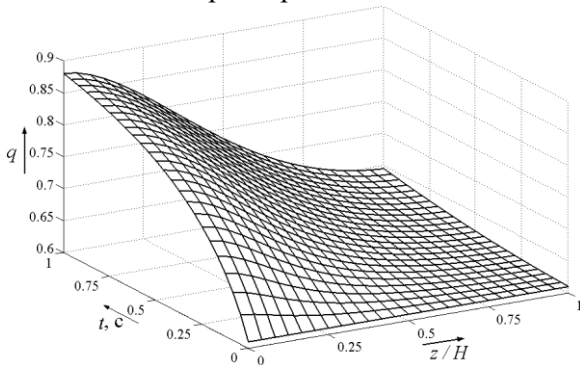


Рис. 5. Залежність відносної кількості дрібних частинок ґрунту  $q$  на відносній висоті  $z/H$  над сепарувальною поверхнею від часу сепарації  $t$

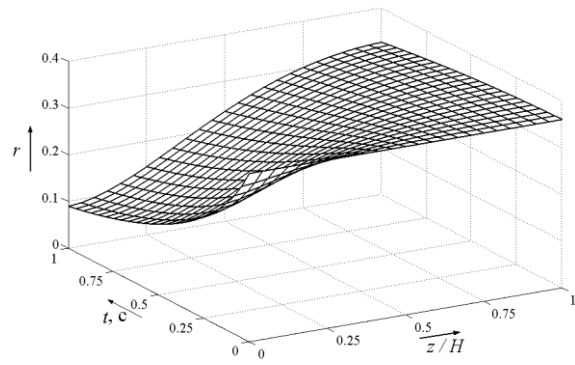


Рис. 6. Залежність відносної кількості крупних частинок ґрунту  $r$  на відносній висоті  $z/H$  над сепарувальною поверхнею від часу сепарації  $t$

Траєкторію руху бульбоносного шару слід розглядати по компонентах – рух бульб та ґрунту. Траєкторія руху бульб циклічна, складається з окремих траєкторій (рис. 7), рух з нижньої точки  $1_o^k$  до точки початку скочування  $2_o^k$  та траєкторії скочування по внутрішній стороні конусного сепаратора до точки  $3_o^k$ , далі подібно від точки  $3_o^k$  до  $4_o^k$  з послідовним скочуванням до точки  $5_o^k$ .

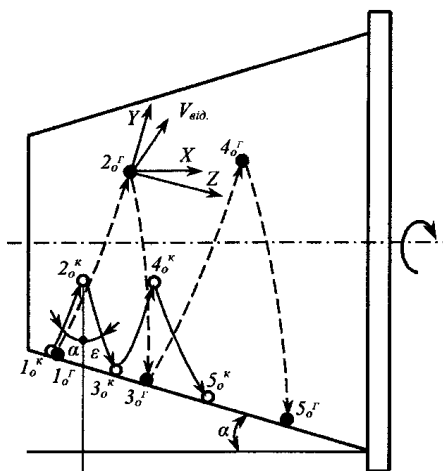


Рис. 7. Схема руху траєкторії часток бульб і ґрунту

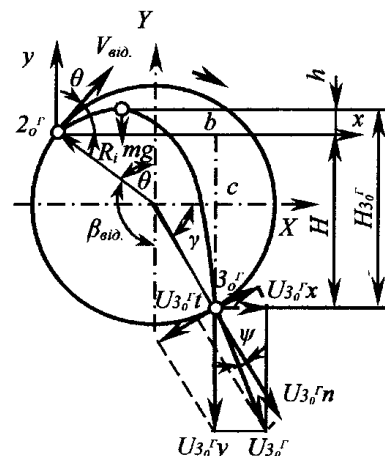


Рис. 8. Схема руху частки ґрунту в поперчній площині



Траєкторія ґрунту відрізняється від руху бульб тим, що в ній майже відсутнє скочування частинок за рахунок різних  $f$  – коефіцієнтів ковзання тіла (ґрунту і бульб) по матеріалу [13], а спостерігається їх політ від точки відриву до точки удару з внутрішньою поверхнею конуса. Тому відрізки траєкторії  $1_o \dots 2_o^2$ ,  $3_o^2 \dots 4_o^2$  і т.д. подібні траєкторії руху бульб, а відрізки  $2_o^2 \dots 3_o^2$ ,  $4_o^2 \dots 5_o^2$  – це параболічні траєкторії вільного польоту часток із початковими умовами характерними для точок відриву відповідно  $2_o^2$ ,  $4_o^2$  і т.д.

Тому задачею теоретичних досліджень є математичний опис та аналіз траєкторії руху (польоту) елементів бульбоносного шару ті визначення швидкостей руху останніх як складових (за напрямком осі, поздовж твірної конуса), так і повних.

Початок координат приймаємо в точці  $2_o^2$ , де проходить відрив частки від поверхні конусного барабана (рис. 8). Рух частки проходить після відриву сили тяжіння, проекції яких на осі координат наступні [13]:

$$X = 0; Y = -mg \cos \alpha; Z = mg \sin \alpha.$$

Диференціальне рівняння руху частки ґрунту по осях:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = 0; m \frac{d^2y}{dt^2} = -mg \cos \alpha; m \frac{d^2z}{dt^2} = mg \sin \alpha.$$

Інтегруючи диференціальне рівняння і приймаючи до уваги початкові умови руху  $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ , знаходимо кінематичні рівняння руху:

$$x = V_{\text{від.}} \cos \theta t; y = V_{\text{від.}} t \sin \theta - (gt^2 \sin \alpha) / 2; z = (gt^2 \sin \alpha) / 2. \quad (13)$$

Швидкість частки в момент відриву можна знайти, виходячи з того, що проекція всіх сил на нормаль в цей момент рівна нулю:

$$V_{\text{від.}}^2 = R_i \cos \theta \cos \alpha, \quad (14)$$

де  $R_i = R_1, R_2 \dots R_n$  – відповідно радіуси наступних циклів зі збільшенням радіуса для конусного барабана.

Виключаючи параметр  $t$  з першого і другого кінематичних рівнянь та підставляючи значення  $V_{\text{від.}}$ , знаходимо залежність між абсцисою і ординатою:

$$y = x \tan \theta - \frac{x^2}{2R_i \cos^3 \theta}. \quad (15)$$

Рішаючи це рівняння разом з рівнянням поверхні конусного барабана, знаходимо координати  $x_p$  і  $y_p$  точки 30 г падіння частинок:

$$x_p = 4R_i \sin \theta \cos^2 \theta; y_p = -4R_i \sin^2 \theta \cos \theta. \quad (16)$$

Визначимо час польоту частки за формулою (13):

$$t_p = \frac{x_p}{V_{\text{від.}} \cos \theta} = \frac{4R_i \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{R_i \cos \alpha \cos \theta}}. \quad (17)$$

Переміщення вздовж осі  $z$  за час  $t_p$  знайдемо з рівняння (13):

$$z_p = \frac{g \sin \alpha}{2} t_p^2 = 8R_i t_p \sin^2 \theta \cos \theta.$$

Цикл руху частки ґрунту складається з двох фаз: підйому разом із стінкою конусного барабана до кута найбільшого підйому  $\beta_\varepsilon$ , при якому нормальна реакція є рівною нулю, і вільного польоту, за час якого частка переміщається вздовж осі барабану на відстань  $z_p$ . Для руху бульб найбільший кут підйому  $\beta_\kappa$  більший кута тертя  $\phi$  у точці  $2_o^\kappa$  визначається за формулою [13]:

$$\beta_\kappa = \phi + \arcsin \left[ \frac{\omega^2 R_i}{g} \sin \phi \right]. \quad (18)$$

Частка бульби починає ковзати по лінії найбільшого скочування  $2_o^\kappa \dots 3_o^\kappa$ , відхиляючись від вертикалі на кут  $\varepsilon$ ,  $tg \varepsilon$  якого визначаємо згідно формули професора Л.Б. Левінсона [12]:

$$tg \varepsilon = \frac{\sin 2\alpha}{2(tg^2 \beta + \sin^2 \alpha)} = tg \alpha \left[ \frac{\cos^2 \alpha}{tg^2 \beta + \sin^2 \alpha} \right]. \quad (19)$$

Для визначення швидкості переміщення частки ґрунту необхідно знайти час першої і другої фази. Дуга, на якій проходить підйом (перша фаза),  $1_o^2 \dots 2_o^2 = 2\pi - \theta - (\pi/2) - \gamma = 2\pi - 4\theta$ .

Тоді, якщо знехтувати скочування частки, час першої фази:

$$t_n = \frac{(2\pi - 4\theta)}{\omega}. \quad (20)$$



Час, що витрачається на параболічну частину шляху, визначаємо за формулою (17). Час повного циклу:

$$t = t_n + t_p = \frac{2\pi - 4\theta}{\omega} + \frac{4R_i \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{R_i g \cos \alpha \cos \theta}}. \quad (21)$$

Швидкість переміщення вздовж осі конусного барабана:

$$V_L = \frac{z_p}{t} = \frac{4\omega R_i \sqrt{g \cos \alpha} \operatorname{tg} \alpha \sin^2 \theta \cos \theta}{\sqrt{g \cos \alpha} (\pi - 2\theta) + 2\omega \sqrt{R_i \cos \theta} \sin \theta}. \quad (22)$$

Як видно з формули, швидкість осевого переміщення пропорційна кутовій швидкості, радіусу конусного барабана відповідного циклу і тангенсу кута конусності.

Визначимо швидкість частки (грунту)  $V_{\text{від.}}$  в момент відриву, виходячи з того, що в момент відриву проекція всіх сил на нормаль рівна нулю:

$$\sum P_N = N + mg \cos \theta - mR_i \omega^2 = 0. \quad (23)$$

$$\text{Звідси } \omega^2 = \frac{g}{R_i \cos \theta} > 0.$$

Це рівняння показує, що відрив частки (грунту) від поверхні конусного барабана відбудеться раніше, ніж  $\omega$  обернеться в нуль, тобто  $V_{\text{від.}}$  завжди має нормальне значення. Підставивши у вираз  $\omega = V/R_i$ , знайдемо:

$$V_{\text{від.}} = \sqrt{gR_i \cos \theta}. \quad (24)$$

Параметри нерівності польоту частки (грунту):  $x = V_{\text{від.}} \cos \theta t$ ;  $y = V_{\text{від.}} \sin \theta - gt^2/2$ . Виключивши  $t$ , отримаємо рівняння параболічної траєкторії польоту частки (грунту), аналогічну нерівності (15) і відкинувши нульові рішення, маємо нерівність (16).

Відстань від осі абсцис до вищої точки підйому частки (грунту):

$$h = \frac{V_{\text{від.}}^2 \sin^2 \theta}{2g} = 0,5 R_i \sin^2 \theta \cos \theta. \quad (25)$$

Повна висота падіння частки (грунту):

$$H_{3o}^{\circ} = h + H = 4,5 R_i \sin^2 \theta \cos \theta. \quad (26)$$

У вільному польоті горизонтальна складова швидкості не змінюється:

$$U_{3o_y} = V_{\text{від.}} \cos \theta = \cos \theta \sqrt{R_i g \cos \theta}, \quad (27)$$

Вертикальну складову швидкості визначимо з умови вільного падіння тіла з висоти  $U_{3o}^{\circ} = H + h$ :

$$U_{3o_y} = \sqrt{2gH_{3o}^{\circ}}. \quad (28)$$

Підставивши значення  $H_{3o}^{\circ}$  з формули (26), знайдемо:

$$U_{3o_y} = 3 \sin \theta \sqrt{R_i g \cos \theta}.$$

Повна швидкість руху частки (грунту) при ударі:

$$U_{3o}^{\circ} = \sqrt{U_{3o_x}^2 + U_{3o_y}^2} = \sqrt{R_i g \cos \theta (9 - 8 \cos^2 \theta)}. \quad (29)$$

Щоб більш точно судити про ступінь руйнування частки ґрунту, необхідно знати нормальну і дотичну складові швидкості  $V_{3o}^{\circ}$  при зустрічі їх з конусним барабаном.

Поверхня самого барабана не має нормальної складової швидкості, а тангенціальна складова швидкість рівна його коловій швидкості  $V_{\text{іб}} = \omega R_i$ .

Позначимо кут нахилу швидкості частки (грунту) до нормалі через  $\psi$  і визначимо синус цього кута  $\sin \psi = U_{3o}^{\circ} t / U_{3o}^{\circ}$ . Визначимо нормальну складову швидкості:

$$U_{3o_n} = \sqrt{R_i g \cos \theta [9 - 8 \cos^2 \theta - 4 \cos^2 (2\theta) + \cos^2 (4\theta)]}. \quad (30)$$

Після перетворень знайдемо значення кута  $\theta$ , при якому тангенціальна складова швидкості частки (грунту) при ударі  $U_{3o}^{\circ} t$  буде рівна нулю:

$$\cos^2 (2\theta) - \cos (2\theta) - \frac{1}{2} = 0;$$

$$\text{Дійсним рішенням нерівності є } \cos (2\theta) = \frac{1 - \sqrt{3}}{2} = -0,3661.$$



Звідси  $\theta = 55^{\circ}45'$ , відповідно  $\beta_{\text{від.}} = 124^{\circ}15'$  і  $\gamma = 77^{\circ}15'$ . Ця точка є границею, вище якої (при  $\gamma < 77^{\circ}15'$ ) тангенціальна складова швидкості частки (грунту) співпадає з напрямком обертання барабана, а нижче (при  $\gamma > 77^{\circ}15'$ ) буде направлена у протилежну сторону і тангенціальна складова швидкості частки (грунту) і барабана при ударі будуть складатися.

Ідеальним випадком є  $U_{3\sigma} = \omega R$ . Кут  $\theta$  для цього випадку може бути визначений з нерівності:

$$\cos^2 \theta [2 \cos(2\theta) - \cos(4\theta)] = \omega \sqrt{R/g}.$$

Аналіз цієї нерівності показує, що умова  $U_{3\sigma} = 0$  може бути досягнута при куті  $\beta_{\text{від.}} = 140 \dots 160^{\circ}$  і  $\gamma \approx 90^{\circ}$  шляхом підбору відповідної кутової швидкості  $\omega$  барабана.

Визначимо шлях, який пройшла частка бульби по конусному барабані:

$$S = \frac{L}{\sin \delta}, \quad (31)$$

де  $L$  – довжина конусного барабана,  $L = 0,70$  м, з конструктивних міркувань;  $\delta$  – кут підйому гвинтової лінії (рис. 8) ( $1_{\sigma}^k 2_{\sigma}^k 3_{\sigma}^k$ ),  $\delta = \varepsilon + \alpha = 2\alpha$ .

Визначимо швидкість осевого переміщення частки (бульб)  $V_L$ , використовуючи нерівність (31). Час перебування частки (бульб) в конусному барабані:

$$T = \frac{L}{V_L} = \frac{k2\pi R_i}{\omega R_i}, \quad (32)$$

де  $k$  – кількість обертів конусного барабану. Звідси  $V_L = \frac{L\omega}{k2\pi}$ .

Підставивши значення  $L = k2\pi R_i \text{tg} \delta$ , знайдемо:

$$V_L = \frac{\pi R_i}{30} k \text{tg} \delta = \omega R_i \text{tg} \delta. \quad (33)$$

Зробивши аналіз нерівностей (33) і (22), бачимо, що при кутовій швидкості  $\omega = V_k/R_i$ , де  $V_k = V_m = 2,22$  м/с, радіусі більшої основи барабана  $R_i = 0,54$  м і куті конусності барабанного сепаратора в межах  $\alpha_{\sigma} = 5 \dots 10^{\circ}$  [12], оптимальними слід вважати наступні режими роботи сепаратора: швидкість подачі по барабанно-конусному сепараторі, працюючому при постійному скочуванні бульб (перша фаза)  $V_L \approx 0,39 \dots 0,81$  м/с з часом сепарації  $T_c \approx 0,86 \dots 1,80$  с і шляхом  $S \approx 2,05 \dots 4,03$  м; час (21), що витрачається на параболічну частину шляху часток ґрунту (друга фаза) при куті конусності барабанного сепаратора  $\alpha_{\sigma} = 10^{\circ}$ ,  $t_c \approx 1,57$  с зі швидкістю подачі  $V_L \approx 0,29$  м/с.

Із розглянутого випливає, що чим більша висота падіння частки (ґрунту) в залежності від змінного радіуса конусного барабана, тим краще проходить руйнування грудок при ударі з нормальною і дотичною складовою швидкістю.

Основний ефект барабанно-конусних сепараторів – більша довжина шляху матеріалу по сепарувальній поверхні і відповідно більший час контакту з нею. Так, при конусності барабана  $\alpha_{\sigma} = 5 \dots 10^{\circ}$  частка проходить шлях в 3-5 раз більший його довжини.

## 5. Модель просіювання прохідної фракції ґрунту з нижнього шару вороху.

Після попадання картопляного вороху на запропоновану схему барабанного сепаратора проходить миттєве просіювання дрібних часток ґрунту з сепаратора за час  $t$ , а далі проходить процес перемішування, руйнування крупних часток ґрунту і просіювання прохідної фракції з нижнього шару вороху.

Користуючись рис. 2, розглянемо процес сепарації ґрунту, який відбувається на барабанному сепараторі при неповному його завантаженні (тонким або одним шаром) після просіювання дрібної фракції ґрунту, а саме з нижнього шару вороху.

Якщо припустити, що швидкість відсіву дрібних часток ґрунту в любий момент часу пропорційна кількості цих частин  $q$ , що знаходяться на сепараторі в момент  $t$  від початку відсіву, то рівняння запишеться так:

$$dq / dt = -kq \rightarrow dq = -kqdt,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

Після інтегрування знайдемо:

$$\ln \frac{q}{q_0} = -kt,$$

де  $q_0$  – кількість дрібних часток ґрунту (по масі) в початковий момент при  $t = 0$ .



Далі знаходимо відоме рівняння повноти виділення прохідної фракції з суміші:

$$\varepsilon = \frac{q_0 - q}{q_0} = 1 - e^{-kt}. \quad (34)$$

Показник просіваючої здатності ґрунту:

$$v = \frac{q_0}{Q} (1 - e^{-kt}).$$

На рис. 9 показано діаграму просіювання картопляного вороху, де крива  $OM_xC$  – процес без руйнування грудок і крива  $OM_x'C'$  – процес саморуйнування крупних частинок непрохідної фракції.

Розглянемо математичну модель, що враховує безперервне саморуйнування грудок на сепарувальній поверхні. Користуючись діаграмою, використали раніше прийняте позначення (12). Загальна кількість вороху, що поступає на сепаратор,  $Q_0 = q_0 + r_0 + k_0$ .

Введемо показник відносного вмісту дрібного ґрунту в початковому продукті  $\tau = q_0/Q_0$ . Назвемо його коефіцієнтом кришення ґрунту, тоді:

$$v = q_0/Q_0 = \tau \cdot \varepsilon. \quad (35)$$

Позначимо:  $r(t_i)$  – кількість знову створених дрібних частинок ґрунту в результаті руйнування крупних частинок за час  $t$ ;  $q$  – загальна кількість дрібних частинок, що просіялися за час  $t$ ;  $Q(t_i)_1$  – кількість ґрунту, просіяного на відрізку сепаратора довжиною  $x$  за час  $t$ ;  $q(t_i)$  – кількість дрібних частинок (старих і нових), що знаходяться на сепараторі у момент  $t$ ;  $r(T)$  – кількість крупних грудок, що залишилися незруйнованими і зійшли з сепаратора після деякого кінцевого часу  $T$  перебування всієї маси  $Q_0$  на сепараторі,  $k(T)$  – кількість відсепарованих бульб, що зійшли з сепаратора після деякого кінцевого часу  $T$ . Тоді повнота сепарації ґрунту:

$$v = \frac{q(T)}{Q_0}.$$

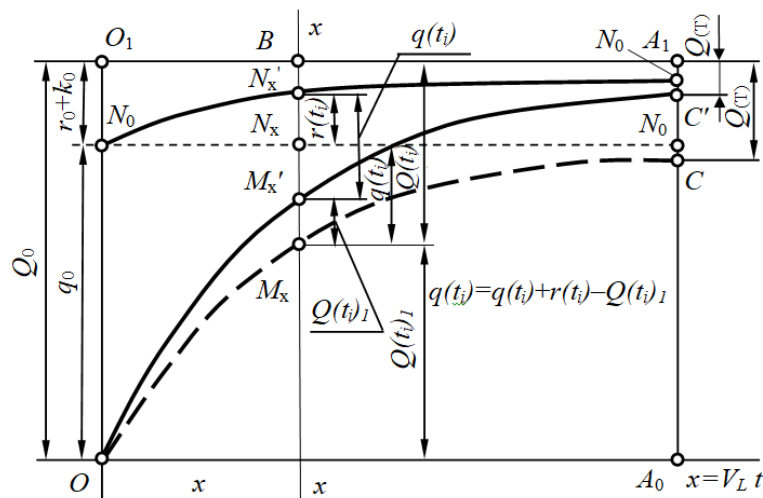


Рис. 9. Діаграма просіювання картопляного вороху

Припустимо, що процеси руйнування крупних грудок і просіювання дрібних частинок незалежні, що цілком допустимо при неповному завантаженні сепаратора. Припустимо також, що швидкість виділення дрібних частинок з великих пропорційна кількості крупних грудок на сепараторі, а швидкість просіювання дрібних частинок пропорційна їх кількості на сепараторі, тобто:

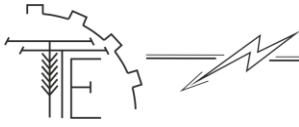
$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= f_1(t_i)(r_0 - r(t_i)) \text{ при } r(0) = 0; \\ \frac{dq}{dt} &= f_2(t_i)(q_0 + r(t_i) - q(t_i)) \text{ при } q(0) = 0; \end{aligned} \quad (36)$$

де  $f_1, f_2$  – деякі випадкові функції  $f_1(t_i) \geq 0; f_2(t_i) \geq 0$ .

Із нерівності (34)

$$\int_0^r \frac{dr}{r_0 - r(t_i)} = \int_0^t f_1(t_i) dt.$$

Позначимо



$$\int_0^t f_1(t_i) dt = F_1(t_i) \geq 0.$$

Тоді

$$\frac{r_0 - r(t_i)}{r_0} = e^{-F_1(t_i)}; \quad r(t_i) = r_0(1 - e^{-F_1(t_i)}). \quad (37)$$

Підставивши значення  $r(t_i)$  із виразу (35) в нерівність (36), знайдемо при  $q(0) = 0$ :

$$\frac{dq}{dt} = f_2(t_i)q = f_2(t_i) \left[ Q_0 - r_0 e^{-F_1(t_i)} \right].$$

Рішаючи рівняння (37), знайдемо вираз для визначення кількості просіяного ґрунту:

$$q(t_i) = e^{\int_0^t f_2(\tau) d\tau} \int_0^t f_2(\tau) \left[ Q_0 - r_0 e^{-F_1(\tau)} \right] e^{-\int_0^{\tau} f_2(\lambda) d\lambda} d\tau.$$

Позначимо  $\int_0^t f_2(\tau) d\tau = F_2(t_i) \geq 0$ ;  $F_2(0) = 0$ .

Так як  $\frac{dF_2}{dt} = f_2(t_i)$ , то

$$q(t_i) = e^{-F_2(t_i)} \int_0^t \left[ Q_0 - r_0 e^{-F_1(\tau)} \right] d e^{F_2(\tau)} = Q_0 e^{-F_2(t_i)} \int_0^t d e^{F_2(\tau)} - r_0 e^{-F_2(t_i)} \int_0^t e^{-F_1(\tau)} d e^{F_2(\tau)};$$

$$q(t_i) = Q_0 (1 - e^{-F_2(t_i)}) - r_0 e^{-F_2(t_i)} \int_0^t e^{-F_1(\tau)} d e^{F_2(\tau)}. \quad (38)$$

Підставивши значення  $q(t_i)$ , яке виходить із виразу (38) при  $t = T$ , в нерівність (34), знайдемо показник просівальної здатності ґрунту:

$$v = 1 - e^{-F_2(T)} \left[ 1 + (1 - \tau) \int_0^T e^{-F_1(\tau)} d e^{F_2(\tau)} \right]; \quad (39)$$

$$r(T) = r_0 - r(t_i).$$

Із виразу (37)

$$r(T) = r_0 e^{-F_1(T)}. \quad (40)$$

$$q(T) = Q_0 - r(T) - q(t_i) = Q_0 e^{-F_2(T)} + r_0 \left[ e^{-F_2(T)} \int_0^T e^{-F_1(t)} d e^{F_2(t)} - e^{-F_2(T)} \right]. \quad (41)$$

Якщо  $f_1(t_i) = k_1$ ,  $f_2(t_i) = k_2$ , тоді  $F_1(t_i) = k_1 t_i$ ,  $F_2(t_i) = k_2 t_i$ , і вирази (39)-(41) приймуть вигляд:

$$v = 1 - e^{-k_2 T} + (1 - \tau) \frac{k_2}{k_2 - k_1} (e^{-k_2 T} - e^{-k_1 T}); \quad (42)$$

$$r(T) = r_0 e^{-k_1 T};$$

$$q(T) = Q_0 e^{-k_2 T} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} r_0 \left[ e^{-k_2 T} - \frac{k_1}{k_2} e^{-k_1 T} \right].$$

Рівняння (41) відображає процес просівальної здатності ґрунту з урахуванням саморуйнування грудок при їх переміщенні по сепаратору. У нього входять невідомі коефіцієнти:  $k_1$  – характеризує руйнування грудок,  $k_2$  – визначає здатність ґрунту до просіювання.

Оскільки розроблену модель процесу сепарації картопляного вороху аналітично розв'язати та проаналізувати неможливо, її було реалізовано за допомогою числових методів у математичному пакеті MATLAB 6. Графічна інтерпретація моделі процесу сепарації картопляного вороху має вигляд (рис. 10, 11).



Залежність кількості ґрунту непрхідної фракції у воросі з урахуванням саморуйнування грудок при їх переміщенні по сепаратору має вигляд (рис. 2.35):

$$r(z, t_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi b\Delta t}} \int_0^h r(z, t_i) \left( e^{-\frac{(x-z)^2}{2b\Delta t}} + (1-\tau) e^{-\frac{(x+z)^2}{2b\Delta t}} + e^{-\frac{(x+z-2h)^2}{2b\Delta t}} \right) dx - r(z, t_i) \cdot (1 - k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot z} \Delta t). \quad (43)$$

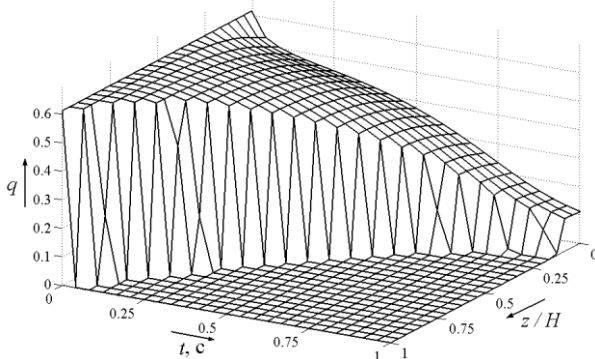


Рис. 10. Динаміка зміни відносної кількості дрібних частинок ґрунту  $q$  на відносній висоті  $z/H$  від сепарувальної поверхні

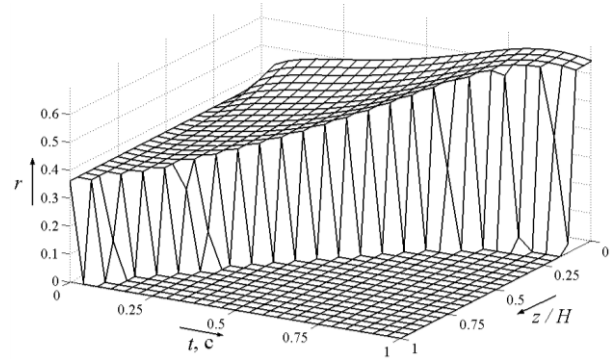


Рис. 11. Динаміка зміни відносної кількості крупних частинок ґрунту  $r$  на відносній висоті  $z/H$  від сепарувальної поверхні

Рівняння (9) і (11) для інших складових вороху залишаються без змін.

З рис. 10, 11, видно, що внаслідок перемішування вороху та просіювання дрібних грудок ґрунту в нижньому шарі вороху збільшується відносна кількість крупної фракції ґрунту, яка має можливість інтенсивно подрібнюватись та просіюватись в процесі сепарації.

### 6. Моделювання пошкодження бульб.

Характер пошкоджуючих дій сепаратора на бульби подібний до руйнуючого впливу на грудки – інтенсивність пошкоджень бульб картоплі буде збільшуватись із наближенням до сепарувальної поверхні і буде функцією від коефіцієнта інтенсивності сепарації, тривалості сепарації та відстані від бульби до сепарувальної поверхні:

$$\varepsilon_{\delta}(z, t_i) = k_3 e^{-k_4 \cdot z} t_i, \quad (44)$$

де  $\varepsilon_{\delta}$  – ступінь пошкоджень бульб;

$k_3$  – коефіцієнт, що характеризує здатність бульб до пошкодження;

$k_4$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь зниження інтенсивності пошкоджень бульб сепаратором із віддаленням від робочої поверхні;

$z$  – віддаль від бульби до робочого органу, м;

$t_i$  – час сепарації, с.

Тоді залежність кількості пошкоджених бульб запишеться наступним чином:

$$m_{n\delta}(z, t_{i+1}) = Qk(z, t_i) \cdot (1 - k_3 \cdot k_3 e^{-k_4 \cdot z} \Delta t). \quad (45)$$

Відповідно ступінь пошкоджень бульб сепаратором буде дорівнювати:

$$P_{\delta} = Q \int_0^T \int_0^h (k(z, t_i) \cdot (1 - k_3 \cdot e^{-k_4 \cdot z} \Delta t)) dz dt. \quad (46)$$

Значення коефіцієнтів  $k_3$  та  $k_4$ , які характеризують опір бульб пошкоджуючій дії сепаратора, можна визначити емпіричним шляхом аналізу ступеня пошкоджень бульб сепаратором на різних режимах роботи.

### 5. Висновки

У результаті аналізу математичної моделі процесу сепарації картопляного вороху у барабанному сепараторі визначено раціональні параметри процесу сепарації: час сепарації  $T_c \approx 0,86$  с, початкова раціональна товщина шару вороху на сепараторі  $h_k \approx 0,140 \dots 0,250$  м. На основі цих параметрів визначено раціональні значення параметрів та режими роботи барабанного сепаратора: довжина робочої поверхні  $L = 0,70$  м, діаметр більшої основи сепаратора  $D = 1,08$  м, діаметр прутків  $d_n = 0,010$  м, просвіти між прутками  $t = 0,030 \dots 0,037$  м, колова швидкість барабана  $V_k = 2,22$  м/с, подача





вороху на сепаратор  $Q = 92,2$  кг/с. Для цих значень параметрів коефіцієнт просіваючої здатності ґрунту  $\nu = 93,4\%$ , а ступінь пошкоджень бульб  $P_6 = 1,61\%$ .

### 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 Juri, Komarnitsky Sergiy. Modelling of the separation process of the potato stack. *Agricultural Engineering : czasopismo. Polskie Towarzystwo Inzynierii 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., Калетнік 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. 416с.

### 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., Medvedyev, YE. P. (2019). The technological process pattern of potato root harvester [The technological process pattern of potato root harvester]. *Zhurnal «Podil's'kyu visnyk: sil's'ke hospodarstvo, tekhnika, ekonomika»*. № 31. Kam"yanets'-Podil's'kyu. 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 naukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi zhurnalu «WayScience»*. 4-5



- kvitnya 2019. Dnipro. pp. 274-282. [in Ukrainian].
- [5] Fyrman, YU. P., Hrushetsky, 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 naukovo-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 ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ КАРТОФЕЛЬНОГО ВОРОХА В БАРАБАННЫХ СЕПАРАТОРАХ

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 процессов сепарации картофельного вороха в барабанном сепараторе.

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 процесса сепарации картофельного вороха в барабанном сепараторе, которая включает следующие основные процессы: модель просеивания проходной фракции почвы из верхнего слоя вороха; модель перемешивания вороха; модель разрушения комков почвы на сепараторе; модель



кинematicкой анализ картофельного вороха в барабанном сепараторе; модель просеивания проходной фракции почвы с нижнего слоя вороха; модель повреждения клубней и других конструктивных и кинematicких параметров рабочих органов барабанного сепаратора.

**Ключевые слова:** модель процесса сепарации, картофель, картофелеуборочная техника, технология, процесс сепарации, барабанный сепаратор, уборка картофеля, сепарация, ворох.

**Ф. 46. Рис. 11. Лит. 13.**

### MODELING OF POTATO MILL SEPARATION PROCESSES IN A DRUM SEPARATOR

*In order to successfully enter Ukraine into the western markets, it is necessary to ensure the competitiveness of its products, which is achieved through the complex mechanization of technological processes, reduction of labor costs, increase in yield and quality of the products obtained.*

*The most common method of mechanized harvesting of potatoes is the erosion of the tuber layer with its subsequent destruction and the separation of tubers from heap, which contains vegetable impurities, soil tubers and stones. The most difficult is the separation from the tubers of solid soil clumps and stones. Attempts have been made to overcome this problem by placing potatoes on well-sown sandy soils with the help of special agrotechnical techniques that reduce, to some extent, the number of tubers. However, such measures are local, not sufficiently reliable and significantly complicate technology. About 25% of the area occupied by potatoes is heavily clogged with stones, the size of which is close to the size of tubers, and about 40% of the planted potatoes are placed on soils prone to significant lumps.*

*Accordingly, the purpose of the study was to conduct a comparative analysis of technologies and machines for potato harvesting, to develop a model of the process of separation of potato pile in a drum separator.*

*The researches were carried out by technological and structural analysis of technologies and machines for potato harvesting. During the research, the methods of comparison and mathematical modeling of technological processes were used. The information base of the research was the works 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 affecting the agrotechnical indices of the harvesting technique have been identified, a model of the process of separation of potato pile in a drum separator has been developed, which includes the following basic processes: model of sifting of a through fraction of soil from the top layer of pile; heap mixing model; model of destruction of soil lumps on the separator; model kinematic analysis of potato pile in a drum separator; model of sifting of the passable soil fraction from the bottom layer of the pile; model of damage to tubers and other structural and kinematic parameters of the working bodies of the drum separator.*

**Key words:** model of separation process, potatoes, potato harvesting machinery, technology, separation process, drum separator, potato harvesting, separation, heap.

**F. 46. Pic. 11. Ref. 13.**

### 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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:yaropud77@gmail.com)).