

LUTSK  
NATIONAL  
TECHNICAL  
UNIVERSITY

ISSN 2307-1699

AGRICULTURAL MACHINES

А  
С  
М

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ



2020' 44

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

# СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

---

JOURNAL OF SCIENTIFIC ARTICLES  
AGRICULTURAL MACHINES



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ISSN 2307-1699

AGRICULTURAL MACHINES  
**АМ**  
СМ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

# СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

## ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

Щоквартальне наукове  
видання

Збірник заснований  
1995 року

*У збірнику відображені  
наукові досягнення у галузі  
агроінженерії.*

*Збірник призначений для  
наукових працівників,  
викладачів, докторантів  
та аспірантів.*

**Засновник і видавець:**  
*Луцький національний  
технічний університет*

**Випуск 44**

**ТЕХНОЛОГІЯ**

\*\*\*

**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС**

\*\*\*

**ТЕХНІКА**

Луцьк 2020

УДК 631.3

**Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Вип. 44. – Луцьк, 2020. – 166 с.**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Луцького національного технічного університету  
(протокол №9 від 04.06.2020 р.)*

*Збірник включений до категорії “Б” Переліку наукових фахових видань  
України, технічні науки за спеціальностями 133 та 208  
(наказ Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020 року)*

*Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ №15902-4374 ПР від 13.11.2009 р.*

### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**Головний редактор:**

Ігор ДУДАРЄВ, *д.т.н., професор, Луцький НТУ, Україна.*

**Заступник головного редактора:**

Володимир ДІДУХ, *д.т.н., професор, Луцький НТУ, Україна.*

**Відповідальний секретар:**

Руслан КІРЧУК, *к.т.н., професор, Луцький НТУ, Україна.*

**Члени редакційної колегії:**

Валентин ВЛАДУТ, *Ph.D., ІНМА, Румунія;*

Роман ГЕВКО, *д.т.н., професор, ТНТУ ім. І. Пулюя, Україна;*

Олександр ГЕРАСИМЧУК, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Тетяна ГОЛОВЕНКО, *д.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Віктор ЗАХАРЧУК, *д.т.н., професор, Луцький НТУ, Україна;*

Тетяна КУЗЬМІНА, *д.т.н., професор, ХНТУ, Україна;*

Роман КУЗЬМІНСЬКИЙ, *д.т.н., професор, ЛНАУ, Україна;*

Олена НАЛОБІНА, *д.т.н., професор, НУВГП, Україна;*

Віталій ПУЦЬ, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Луїс РІБЕЙРО, *Ph.D., професор, ІРВ, Португалія;*

Роман РОГАТИНСЬКИЙ, *д.т.н., професор, ТНТУ ім. І. Пулюя, Україна;*

Микола СВІРЕНЬ, *д.т.н., професор, ЦНТУ, Україна;*

Ганна ТІХОСОВА, *д.т.н., професор, ХНТУ, Україна;*

Микола ТОЛСТУШКО, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Наталія ТОЛСТУШКО, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Гедаль ХАЙЛІС, *д.т.н., професор, Уманський НУС, Україна;*

Ігор ЦИЗЬ, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна;*

Віктор ШЕЙЧЕНКО, *д.т.н., професор, ПДАА, Україна;*

Олександр ШОВКОМУД, *к.т.н., доцент, Луцький НТУ, Україна.*



MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE  
LUTSK NATIONAL  
TECHNICAL UNIVERSITY

ISSN 2307-1699

AGRICULTURAL MACHINES  
**AM**  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

# AGRICULTURAL MACHINES

JOURNAL OF SCIENTIFIC ARTICLES

**Quarterly Scientific  
Publication**

**Founded in 1995**

*The scientific achievements  
in the agricultural  
engineering are presented.*

*The journal is intended for  
science officers, lectures,  
PhD students and advanced  
students.*

**Founder and publisher:**  
*Lutsk National Technical  
University*

**Volume 44**

**TECHNOLOGY**

\*\*\*

**TECHNOLOGICAL PROCESS**

\*\*\*

**MACHINERY**

**Lutsk 2020**

UDC 631.3

**Agricultural machines. Vol. 44. Lutsk, 2020. 166 p.**

*Academic Council of Lutsk National Technical University  
confirmed for printing  
(record №9 dated June, 4, 2020)*

*The Journal is inscribed to the category “B” of the List of Scientific Professional Publications of Ukraine (Technical Sciences by Specialties 133, 208) maintained by order of Ministry of Education and Science of Ukraine №409 dated March, 17, 2020*

*The State Registration Certificate of printed mass media  
KB №15902-4374 ИП dated November, 13, 2009*

## **EDITORIAL BOARD**

### ***Editor-in-Chief:***

Igor DUDAREV, *D.Sc., Professor, Lutsk NTU, Ukraine.*

### ***Deputy Editor-in-Chief:***

Volodymyr DIDUKH, *D.Sc., Professor, Lutsk NTU, Ukraine.*

### ***Executive Editor:***

Ruslan KIRCHUK, *Ph.D., Professor, Lutsk NTU, Ukraine.*

### ***Members of Editorial Board:***

Valentin VLADUT, *Ph.D., INMA, Romania;*

Roman HEVKO, *D.Sc., Professor, TNTU, Ukraine;*

Oleksandr GERASIMCHUK, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Tetiana GOLOVENKO, *D.Sc., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Viktor ZAKHARCHUK, *D.Sc., Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Tetiana KUZMINA, *D.Sc., Professor, KNTU, Ukraine;*

Roman KUZMINSKY, *D.Sc., Professor, LNAU, Ukraine;*

Olena NALOBINA, *D.Sc., Professor, NUWEE, Ukraine;*

Vitalii PUTS, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Luis RIBEIRO, *Ph.D., Professor, IPB, Portugal;*

Roman ROGATINSKY, *D.Sc., Professor, TNTU, Ukraine;*

Mykola SVIREN, *D.Sc., Professor, CUNTU, Ukraine;*

Hanna TIKHOSOVA, *D.Sc., Professor, KNTU, Ukraine;*

Mykola TOLSTUSHKO, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Nataliia TOLSTUSHKO, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Hedal HAYLIS, *D.Sc., Professor, Uman NTU, Ukraine;*

Ihor TSYZ, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine;*

Viktor SHEYCHENKO, *D.Sc., Professor, PSAA, Ukraine;*

Oleksandr SHOVKOMUD, *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk NTU, Ukraine.*

## ЗМІСТ

<b>В.І. Бодак, Г.А. Хайліс, О.С. Дубицький, П.В. Мазилюк</b> Дослідження руху частинки сапропелю в конічній забірній частині шнекового механізму.....	7
<b>К.В. Борак</b> Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин...	18
<b>В.Ф. Дідух, В.В. Тарасюк, Д.В. Тарасюк</b> Дослідження садильного апарату картоплі пасивного типу.....	41
<b>І.М. Дударев, С.Г. Панасюк</b> Дослідження впливу товщини нарізування плодів та коренеплодів на площу поверхні шматочків.....	51
<b>І.М. Дударев, І.В. Тараймович</b> Обґрунтування нонміксингового способу формування суміші із сипких матеріалів.....	71
<b>Л.Ю. Забродоцька, С.М. Хомич, В.О. Януш, Ю.В. Муравинець</b> Енергетичний розрахунок спіральної сушарки.....	84
<b>О.М. Крупич, Р.С. Шевчук, Р.О. Крупич, С.І. Левко</b> Методики досліджень коефіцієнтів жорсткості та в'язкого опору деформуванню складових ручного віброударного струшувача плодів.....	92
<b>О.О. Налобіна, Т.М. Головенко, М.В. Голотюк, П. Ружанські, О.В. Шовкомуд</b> Наукове обґрунтування розподілу показників якості соломи та трести льону олійного на класи сортності.....	102
<b>М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.П. Олександренко, А.В. Мартинюк, Ю.М. Білик</b> Зносостійкість лап культиватора, що модифіковані азотуванням у тліючому розряді.....	123
<b>Г.В. Ткаченко, Л.Л. Новак, І.Ф. Улянич, О.А. Єремєєва</b> Розробка зерносушарки BRICE-BACKER з рекуперацією на комбінованих видах палива.....	135
<b>О.Л. Ткачук, О.В. Остапчук, О.П. Герасимчук</b> Обґрунтування технології підготовки тканини із вмістом лляного волокна.....	145
<b>С.В. Ягелюк, В.Ф. Дідух</b> Концептуальна модель технологій переробки стебел льону.....	155

## CONTENT

<b><i>V. Bodak, G. Hailis, O. Dubytskyi, P. Mazyliuk</i></b> Investigation of the movement of a spropel particle in a final intake part of a screw mechanism.....	7
<b><i>K. Borak</i></b> Scientific basis for achieving the self-sharpening effect of the tillers implements.....	18
<b><i>V. Didukh, V. Tarasyuk, D. Tarasyuk</i></b> Research of passive type potato planter.....	41
<b><i>I. Dudarev, S. Panasyuk</i></b> Impact of fruit and vegetable slicing on the area of pieces' surface...	51
<b><i>I. Dudarev, I. Taraymovich</i></b> Reasoning of non-mixing method of mixture forming from bulk materials.....	71
<b><i>L. Zabrodotska, S. Khomych, V. Yanush, Yu. Muravynets</i></b> Energy calculation of the spiral dryer.....	84
<b><i>O. Krupych, R. Shevchuk, R. Krupych, S. Levko</i></b> Methods of research the coefficients of stiffness and viscous resistance to the deformation components manual vibro shock shaker of the fruit.....	92
<b><i>O. Nalobina, T. Holovenko, M. Holotiuk, P. Ruzhansky, O. Shovkomud</i></b> Scientific substantiation for distribution of quality indices of oilseed flax straw and retted straw on grade classes.....	102
<b><i>M. Stechyshyn, M. Luk'yanyuk, V. Oleksandrenko, A. Martynyuk, Yu. Bilyuk</i></b> Warning resistance of cultivator paws modified by nitrogenation in glow discharge.....	123
<b><i>H. Tkachenko, L. Novak, I. Ulyanych, O. Yeremeeva</i></b> Development of BRICE-BACKER grain dryer with recuperation on combined fuels.....	135
<b><i>O. Tkachuk, O. Ostapchuk, O. Herasymchuk</i></b> Justification of preparation technology of flax fiber content fabric...	145
<b><i>S. Yaheliuk, V. Didukh</i></b> A concept model of technologies for processing flax stems.....	155

**INVESTIGATION OF THE MOVEMENT OF A SAPROPEL PARTICLE IN A FINAL INTAKE PART OF A SCREW MECHANISM****V. Bodak<sup>1</sup>, G. Hailis<sup>2</sup>, O. Dubytskyi<sup>1</sup>, P. Mazyliuk<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine<sup>2</sup>Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine**ABSTRACT**

*The article proposes the design of a mechanism for the extraction of sapropels in small and shallow water bodies. The mechanism allows not to dilute sapropel with water and to lift deposits of natural moisture from the bottom of the reservoir. This mechanism is easy to manufacture and operate, much cheaper than analogues, reliable in operation, mobile. Extraction of sapropels by the proposed mechanism improves the environmental performance at the extraction site, as it has a low siltation rate. To develop the design of the intake part of the mechanism, the motion of the sapropel particle during its interaction with the auger blade was analyzed. The dependences for determining the trajectory of sapropel particles in the intake part of the screw pump are theoretically derived. It is proposed to design the screw of the intake part of the mechanism so as to alternately place the intermittent blades with positive and negative values of the angle of inclination of the blade to the plane perpendicular to the axis of rotation of the auger. This will allow more intensive grinding of the compacted lower layer of sapropel. It is determined that the height of the conical intake part should be 2...3 times greater than the height of the screw. In this case, the sapropel particle will not be able to bounce off the blade and out of the conical part.*

**Key words:**

sapropel,  
auger,  
sapropel extraction,  
conical intake,  
blade

**Article history:**

Received 03.03.2020

Accepted 28.05.2020

**Corresponding author:**

Bodak.lutsk@gmail.com



УДК 631.826

**ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ САПРОПЕЛЮ В КОНІЧНІЙ ЗАБІРНІЙ ЧАСТИНІ ШНЕКОВОГО МЕХАНІЗМУ****В.І. Бодак<sup>1</sup>, Г.А. Хайліс<sup>2</sup>, О.С. Дубицький<sup>1</sup>, П.В. Мазилюк<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна

---

*У статті запропонована конструкція механізму для добування сапропелів на малих площах та мілководних водоймах. Механізм дає змогу не розбавляти сапропель водою та піднімати із дна водойми поклади природної вологості. Цей механізм є простим у виготовленні та експлуатації, його вартість значно менша від аналогів, також механізм є надійним в роботі та мобільним. Добування сапропелів запропонованим механізмом покращує екологічні показники на місці добування, оскільки має низький коефіцієнт змулювання. Для розробки конструкції забірної частини механізму було проаналізовано рух частинки сапропелю при взаємодії її із лопаттю шнека. Теоретично виведено залежності для визначення траєкторії руху частинок сапропелю в забірній частині шнекового насоса. Запропоновано гвинт забірної частини механізму конструювати таким чином, щоб по чергово розміщувати перервні лопаті з додатнім та від'ємним значенням кута нахилу лопаті до площини, яка перпендикулярна осі обертання шнека. Це дозволить більш інтенсивно подрібнювати злежаний нижній шар сапропелю. Визначено, що висота конічної забірної частини повинна бути в 2...3 рази більшою за висоту гвинта забірної частини. У такому випадку частинка сапропелю не зможе відбитися від лопаті та вийти із конічної частини, і, відповідно, не буде проходити процес змулювання в зоні добування.*

**Ключові слова:** сапропель, шнек, добування сапропелю, конічна забірна частина, лопать.

---

**Стан питання та постановка проблеми**

Машини, які використовуються для добування сапропелів малоефективні, оскільки мають низькі екологічні показники внаслідок непристосованості до піднімання із дна водойм дрібнодисперсних речовин. Повільно впроваджуються машини, які можуть працювати на невеликих за площею або мілководних водоймах без їх осушення [1]. На сьогодні дорого купувати земснаряди, екскаватори-грейфери, будувати набережні споруди (причали, відстійники). Створені шнекові

механізми для добування сапропелів також мають низку конструктивних недоліків [2].

**Мета дослідження** – провести дослідження процесу добування сапропелів шнековим механізмом із різнонапрямленими лопатями у забірній частині, які б забезпечували розрихлення злежаних нижніх шарів покладів.

### Матеріали і методи

Для математичного опису процесу переміщення частинки сапропелю застосовували методи диференціальної геометрії, класичної механіки, лінійної алгебри та гідравліки. Теоретичні розрахунки перевірялись під час проведення експериментальних досліджень. Також під час дослідження визначалися характеристики механізму для добування сапропелів.

### Результати дослідження та обговорення

Одним із перспективних для добування сапропелів на мілководних та малих за площею водоймах є механізм, що представлений на рис. 1.

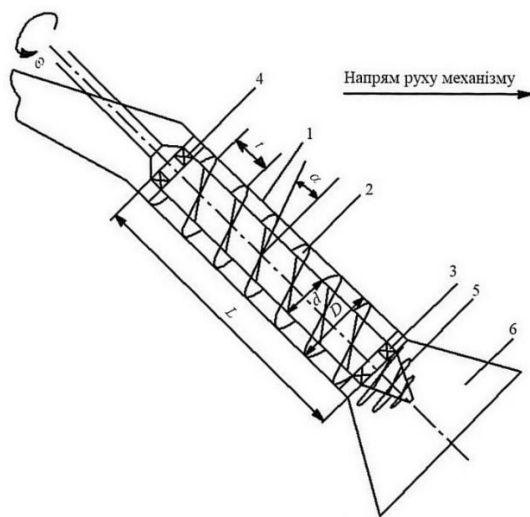


Рис. 1 – Механізм для добування сапропелів:

- 1 – кожух; 2 – шнек; 3, 4 – підшипники; 5 – конічний гвинт;  
6 – забірна кінцева частина

Механізм для добування сапропелів, що виконаний у вигляді гвинтового конвеєра, містить кожух, в якому може обертатися шнек

циліндричної форми. У забірній частині шнек закінчується конічним гвинтом [3, 4]. При обертанні лопаті конічного гвинта подрібнюють масу частинок сапропелю та спрямовують їх вгору. На частинки сапропелю та води діють поперечні складові сил тиску з боку гвинтових лопатей циліндричної частини гвинта, а також складові сили їх тертя по лопаті. Виникаючий момент сили тяжіння частинок та води відносно осі гвинта перешкоджає подальшому обертальному руху переміщуваних частинок, у результаті останні будуть переміщатися вздовж осі конвеєра в напрямку транспортування [5].

У конічній частині механізму проходить подрібнення злежаного шару сапропелю та його волокнистих включень, перемішування частинок шару і їх спрямування вгору, де відбувається їх захоплення лопатями шнека. Розглянемо роботу лопатей конічної частини механізму.

На рис. 2 показана плоска лопать, що обертається навколо похилої осі  $OO'$  із кутовою швидкістю  $\omega$ . При обертанні лопать діє на частинки сапропелю, в тому числі на частинку  $M$ . Лопать відхилена від площини, перпендикулярної до осі  $OO'$ , на кут  $\alpha$ , а її середня лінія  $O_1M$  перпендикулярна осі  $OO'$ . Кут  $\alpha$  є незначним (кут  $\alpha$  менший за  $(90^\circ - \varphi)$ , де  $\varphi$  – кут тертя частинки по поверхні лопаті, град.).

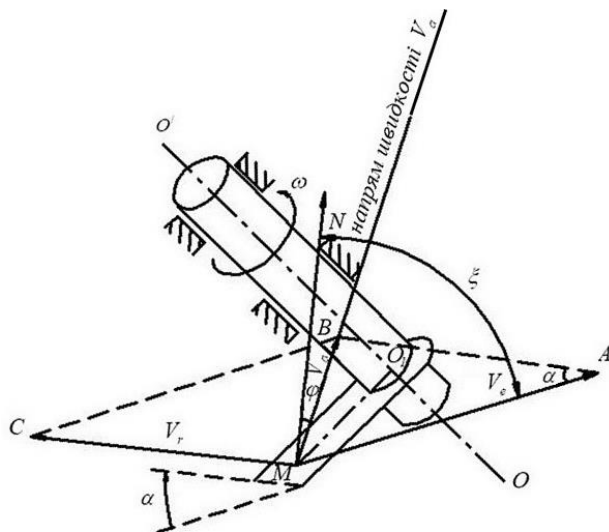


Рис. 2 – Схема до визначення швидкості частинки сапропелю при дії на неї лопаті конічної частини гвинта (у випадку  $\alpha > 0$ )

Частинка  $M$  сапропелю здійснює складний рух, що складається із переносного руху разом із лопаттю і відносного руху відносно лопаті. Швидкість переносного руху  $V_e$  рівна  $\omega r$ , де  $r = O_1M$  – радіус обертання. Швидкість  $V_e$  спрямована перпендикулярно  $O_1M$  та знаходиться в площині, що перпендикулярна  $OO'$ . Швидкість відносного руху  $V_r$  знаходиться в площині лопаті та в площині, що паралельна осі  $OO'$  та перпендикулярна  $O_1M$  і яка проходить через вектор  $V_e$ . Швидкість  $V_r$  відома тільки за своїм напрямком.

Для визначення абсолютної швидкості  $V_a$  частинки врахуємо, що лопать діє на частинки сапропелю та рідини так, як діє клин. Як відомо із теорії клина [6], якщо кут між вектором швидкості точки клина, в якій доторкається частинка, і нормаллю до площини клина більший за кут тертя частинки по верхній клина, то частинка буде рухатися в напрямку, відхиленому від нормалі на кут тертя  $\varphi$  в сторону швидкості точки клина. Застосовуючи до лопаті дане положення, знаходимо, що частинка  $M$  буде рухатись у напрямку вектора швидкості  $V_e$ , який відхилений від нормальної сили  $N$  на кут  $\varphi$  в сторону швидкості  $V_e$ , якщо кут  $\xi$  між векторами  $N$  і  $V_e$  більший за кут  $\varphi$ .

Для визначення швидкостей  $V_r$  та  $V_a$  проведемо із кінця  $A$  вектора  $V_e$  лінію, що паралельна  $V_r$ , до перетину із лінією вектора  $V_a$ . Провівши із кінця  $B$  вектора  $V_a$  лінію, що паралельна вектору  $V_e$ , до перетину із лінією дії вектора  $V_r$ , отримаємо точку  $C$ .

Ураховуючи, що вектор  $N$  знаходиться в площині  $MABC$ , знаходимо, що кут між швидкостями  $V_e$  та  $V_a$  рівний  $(\xi - \varphi)$  (де значення кута  $\xi = (90^\circ - \alpha)$ ;  $\angle MAB = \alpha$ ;  $AB = MC$ ;  $BC = MA$ ). Ураховуючи викладене, справедлива рівність:

$$\frac{V_e}{\sin(180^\circ - \alpha - (\xi - \varphi))} = \frac{V_r}{\sin(\xi - \varphi)} = \frac{V_a}{\sin \alpha}. \quad (1)$$

Звідки, із урахуванням того, що:

$$\left. \begin{aligned} V_e &= \omega \cdot r; \\ V_r &= \omega \cdot r \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$V_a = \omega \cdot r \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi}. \quad (3)$$

Залежності (1) – (3) справедливі за умови  $\alpha < (90^\circ - \varphi)$ . Кут  $\alpha$  при цьому відраховується від площини, яка перпендикулярна до осі  $OO'$ , в сторону кінця  $O'$  вказаної осі. У цьому напрямку кут  $\alpha$  буде зі знаком “+”. Якщо ж лопать відхилена від площини, що перпендикулярна осі  $OO'$ , так, що кут відраховується в сторону кінця  $O$  осі  $OO'$  (рис. 3), то

кут  $\alpha$  буде зі знаком “-”, від’ємним буде і значення швидкості  $V_a$  згідно формули (3). Це означає, що швидкість буде спрямована не в сторону кінця  $O'$  осі  $OO'$ , а в сторону кінця  $O$  осі  $OO'$ .

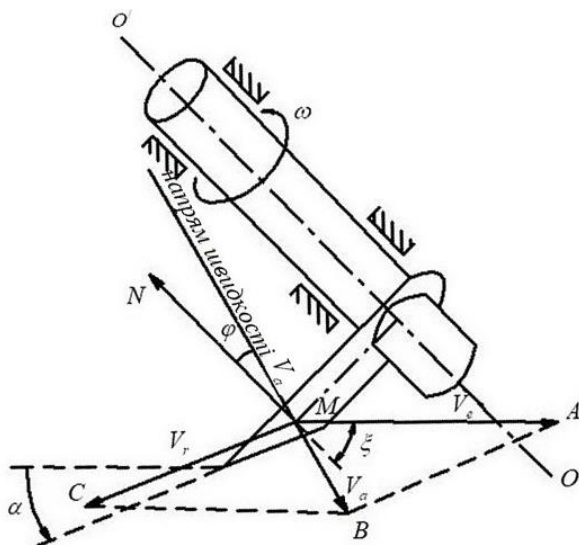


Рис. 3 – Схема до визначення швидкості частинки сапропелю при дії на неї лопаті конічної частини гвинта (у випадку  $\alpha < 0$ )

Ураховуючи викладене, необхідно гвинт забірної частини розглядуваного механізму конструювати таким чином, щоб почергово розміщувати перервні лопаті із додатнім та від’ємним значенням кута  $\alpha$ . Це дозволить більш інтенсивно подрібнювати злежаний нижній шар сапропелю та перемішувати його частинки.

Було розглянуто дію лопаті на окрему частинку сапропелю. У дійсності, кожна лопать працює в рідкому середовищі та діє не на одну частинку, а на весь шар сапропелю і води. При цьому, кожна частинка сапропелю досягаючи швидкості  $V_a$ , рухається в рідині, долаючи її опір. Під час подолання опору, енергія частинки гаситься, а її швидкість зменшується [7]. Розглянемо цей процес.

На рис. 4 показано частинку  $M$ , яка рухається в рідині із початкового положення  $M_0$  на висоті  $H$  від дна озера із початковою швидкістю  $V_a$ . На частинку діє сила тяжіння  $mg$  (де  $m$  – маса частинки, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ) і сила опору середовища  $R$ .

Нехай, сила  $R$  прямопропорційна масі частинки і її швидкості в першій степені, тобто:

$$R = -kmV, \quad (4)$$

де  $V$  – швидкість руху частинки, м/с;  $k$  – коефіцієнт опору, постійний за величиною для певної в'язкості розроблюваної маси (визначається дослідним шляхом).

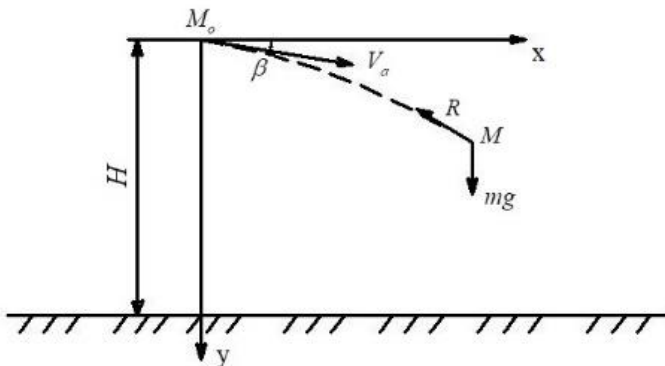


Рис. 4 – Схема руху частинки сапропелю в рідині

Розташуємо початок координат в точці  $M_0$ , вісь  $y$  спрямуємо від точки  $M_0$  вниз, а вісь  $x$  спрямуємо горизонтально. Складемо векторне диференційне рівняння руху частинки:

$$m\bar{w} = m\bar{g} + \bar{R}, \quad (5)$$

де  $\bar{w}$  – вектор прискорення частинки.

Вектори прискорення частинки та сили  $R$ :

$$\bar{w} = \ddot{\bar{r}}, \quad (6)$$

$$\bar{R} = -k \cdot m \cdot \bar{V} = \bar{k} \cdot m \cdot \dot{\bar{r}}, \quad (7)$$

де  $\bar{r}$  – радіус-вектор точки  $M$ ;  $\dot{\bar{r}}$  – перша похідна від  $r$  за часом (вектор швидкості);  $\ddot{\bar{r}}$  – друга похідна за часом (вектор прискорення).

Після скорочення на  $m$ , отримаємо:

$$\ddot{\bar{r}} = \bar{g} - k \cdot \dot{\bar{r}}. \quad (8)$$

Проектуючи рівняння (8) на осі  $x$  і  $y$ , отримаємо диференційне рівняння руху частинки:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= -k \cdot \dot{x}; \\ \ddot{y} &= g - k\dot{y}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  – проєкції швидкості частинки  $M$  на осі координат  $x$  та  $y$ , м/с;  
 $\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$  – проєкції прискорення частинки  $M$  на осі координат  $x$  та  $y$ , м/с<sup>2</sup>.

Проекція  $\ddot{x}$  рівна  $d\dot{x}/dt$  (де  $t$  – час, с), тоді:

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = -k \cdot \dot{x}. \quad (10)$$

Звідки, за початкових умов  $t = 0$ ,  $\dot{x} = V_a \cos \beta$ :

$$\dot{x} = e^{-kt} V_a \cos \beta, \quad (11)$$

де  $\beta$  – кут нахилу вектора швидкості в початковий момент до осі  $x$ , град.

Оскільки  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ , тоді матимемо:

$$dx = e^{-kt} V_a \cos \beta \cdot dt. \quad (12)$$

Після інтегрування (12) та визначення сталої інтегрування за початкових умов  $t = 0$ ,  $x = 0$ , матимемо:

$$x = \frac{V_a \cos \beta}{k} \cdot (1 - e^{-kt}). \quad (13)$$

Для розв'язування другого рівняння системи (9) урахуємо, що:

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt}. \quad (14)$$

Тоді, за початкових умов  $t = 0$ ,  $\dot{y} = V_a \sin \beta$ , матимемо:

$$dy = \frac{kV_a \sin \beta - g}{k} \cdot e^{-kt} dt + \frac{g}{k} dt. \quad (15)$$

Після інтегрування (15) та визначення сталої інтегрування за початкових умов  $t = 0$  і  $y = 0$ , отримаємо:

$$y = \frac{kV_a \sin \beta - g}{k^2} \cdot (1 - e^{-kt}) + \frac{g}{k} t. \quad (16)$$

Таким чином, частинка здійснює рух в прийнятій системі координат згідно рівнянь (13) та (16). Кут  $\beta$  у даних рівняннях додатній, коли він відраховується від горизонталі за годинниковою стрілкою і швидкість  $V_a$  спрямована вправо та вниз (рис. 4). Якщо ж швидкість  $V_a$  спрямована вправо і вгору, тоді кут  $\beta$  буде зі знаком “–”. Таким чином, рівняння справедливі і за додатних значень кута  $\beta$ , і за від'ємних значеннях цього кута.

Скористаємось отриманими рівняннями для визначення радіуса конічної камери. Якщо вісь  $M_0$  у (рис. 4) буде співпадати із краєм лопаті гвинта, із якої сходить частинка сапропелю (рис. 5), тоді для

задовільного перемішування частинок в камері необхідно, щоб виконувалася рівність:

$$M_0 k = \frac{R_k - r_\lambda}{\cos \delta}, \quad (17)$$

де  $M_0 k$  – відстань від точки  $M_0$  до стінки камери, м;  $R_k$  – радіус камери в зоні дії лопаті гвинта, м;  $r_\lambda$  – радіус лопаті, м;  $\delta$  – кут відхилення осі шнека від вертикалі, град.

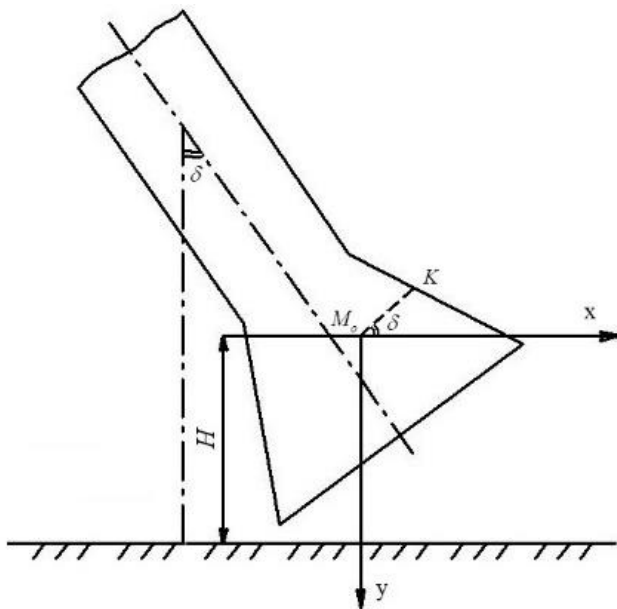


Рис. 5 – Схема до визначення параметрів конічної частини насосу

Внаслідок конусності камери, у випадку  $\frac{R_k - r_\lambda}{\cos \delta} = x_{\max}$  (де  $x_{\max}$  – максимальна абсциса траєкторії руху частинки від краю лопаті до стінки камери, м) можливо, що частинка не доторкнеться до стінок камери.

Ураховуючи зазначене, абсциса  $x_{\max}$  має бути більшою за  $\frac{R_k - r_\lambda}{\cos \delta}$ .

Із другого боку, внизу, в конічній частині насосу  $r_\lambda \rightarrow 0$ . Ураховуючи зазначене, та те, що за малого кута  $\delta$  його косинус прямує  $\cos \delta \rightarrow 1$ , то приходимо до висновку, що повинна мати місце рівність:



$$x_{\max} = \xi_1 R_k, \quad (18)$$

де  $\xi_1$  – коефіцієнт, який рівний  $\xi_1 = 1, 2 \dots 1, 5$ .

Параметр  $x_{\max}$  знаходиться за рівнянням (13) при відомому часі  $t$ , який знаходиться шляхом розв'язування рівняння (16). Якщо в рівняння (16) замість  $y$  підставити величину відстані  $H$  від точки  $M_0$  до дна озера, тоді отримаємо:

$$R_k = \frac{x_{\max}}{\xi_1}. \quad (19)$$

Висоту  $h_0$  конічної частини гвинта вибирають таким чином, щоб вона була значно меншою за висоту конічної камери  $h_1$ , щоб забезпечити захист обертових частин від їх зіткнення із твердими предметами, а також, щоб унеможливити процес змулювання:

$$h_0 = \frac{h_1}{k_1}. \quad (20)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт, який рівний  $k_1 = 2 \dots 3$ .

Кут конусності встановлюється із урахуванням висоти конічної частини і діаметра шнека.

### Висновки

Процес добування сапропелів на малих за площею озерах варто здійснювати шнековим механізмом із різнонапрямленими лопатями в забірній частині, щоб забезпечити розрихлення злежаних нижніх шарів покладів.

Основні параметри руху сапропелевої маси в конічній частині шнекового насоса визначаються на основі залежностей (3), (13) та (16). На основі залежності (20) рекомендовані конструктивні розміри конічної частини шнекового механізму. У відповідності до цих залежностей, забірну конічну частину механізму необхідно конструювати таким чином, щоб розрихлені частинки сапропелю не могли відбиватися від лопатей у зоні розробки та не змулювали водою.

### Список посилань

1. Дідух, В. Ф. Аналіз засобів для добування сапропелів / В. Ф. Дідух, О. П. Шимчук // Тези XXI-ої науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу. – Луцьк, 2006. – С. 105–106.
2. Дідух, В. Ф. Дослідження добування озерного сапропелю з-під шару води та його використання під час виробництва органічних добрив / В. Ф. Дідух, Р. А. Хлопецький, М. М. Поліщук // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк, 2014. – Вип. 29–30. – С. 137–144.

3. Бодак, В. І. Розробка і дослідження механізмів для добування сапропелів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.20.01 / Бодак Володимир Іванович; Луцький індустріальний інститут. – Луцьк, 1996. – 209 с.
4. А.с. №1765311, МПК E02 F3/88. Грунтозаборное устройство землесосного снаряда / Бодак В. И., Дидух В. Ф., Хайліс Г. А., Шевчук М. И.; Бюл. №36, 1992 р.
5. Гевко, Б. М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б. М. Гевко, Р. М. Рогатынский. – Львов : Выща школа, 1989. – 175 с.
6. Хайліс, Г. А. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин / Г. А. Хайліс, Д. М. Коновалюк. – К : НМК ВО, 1992. – 319 с.
7. Дідух, В. Ф. Вибір методу розрахунку процесу різання середнього шару сапропелю / В. Ф. Дідух, Р. А. Хлопецький // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк, 2011. – Вип. 21. Т. I. – С. 110–116.

## SCIENTIFIC BASIS FOR ACHIEVING THE SELF-SHARPENING EFFECT OF THE TILLERS IMPLEMENTS

K. Borak

Zhytomyr agrotechnological college, Zhytomyr, Ukraine



**Key words:**

self-sharpening,  
implement,  
tiller,  
wearing process,  
longevity

**Article history:**

Received 10.04.2020

Accepted 26.05.2020

**Corresponding author:**

koss1983@meta.ua

### ABSTRACT

*According to the recent research materials, it has been established that it is not necessary literally to make a copy of a biological prototype in order to design self-sharpening tillers implements, as there are no prototypes in the wild-life which either work in the identical conditions or have the same objectives. While designing the self-sharpening tillers implements it is expedient to use partially the wild-life principles as well as to take into account the achievements of the engineering science. The paper suggests engineering and constructive methods for achieving the self-sharpening effect of the most widely used tillers implements with due regard to operating conditions. The basic parameters of a double-layer self-sharpening implement include: the correlation of a wear-out resistance on the one hand and of the geometric parameters of a base material and of a wear resistant covering on the other hand, the parameters correlation of a wear-resistant covering in different parts of an implement, the initial sharpening angle and the side of wear-resistant covering. The operational testing's gave evidence to the expedience of introducing the strengthened implements for achieving the sharpening effect on all soil types. The self-sharpening of tillers implements results in reducing the draw bar resistance of a device as well as in reducing the fuel consumption by 10...12%.*

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.296>

УДК 631.31

**НАУКОВІ ОСНОВИ ДОСЯГНЕННЯ ЕФЕКТУ  
САМОЗАГОСТРЮВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН****К.В. Борак**

Житомирський агротехнічний коледж, Житомир, Україна

---

*На основі аналізу джерел інформації встановлено, що для розроблення самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин не потрібно буквально копіювати біологічні прототипи, оскільки в живій природі відсутні прототипи, які працюють в ідентичних умовах та режимах і мають такі ж цілі. При розробці самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин необхідно використовувати частково принципи із живої природи та враховувати досягнення інженерної науки. У статті запропоновані технологічні та конструктивні методи для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів найбільш поширених робочих органів ґрунтообробних машин із урахуванням умов та режимів експлуатації. До основних параметрів двошарового самозагострювального різального елемента робочого органу відносяться: співвідношення зносостійкості і геометричних параметрів матеріалу основи та зносостійкого покриття, співвідношення параметрів зносостійкого покриття в різних зонах робочого органу, початковий кут загострення та сторона нанесення зносостійкого покриття. Експлуатаційні випробовування підтвердили доцільність впровадження зміцнення робочих органів для досягнення ефекту самозагострювання їх різальних елементів на всіх типах ґрунтів. У результаті самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається зменшення тягового опору агрегату та витрати пального на 10...12%.*

**Ключові слова:** самозагострювання, робочий орган, ґрунтообробна машина, зношування, довговічність.

---

**Стан питання та постановка проблеми**

У ґрунтообробних машинах різальні елементи (РЕ) робочих органів (РО), від яких залежить якість і ефективність виконання технологічного процесу обробітку ґрунту, мають найменшу надійність. Втрата працездатного стану РО ґрунтообробних машин

призводить до простою, що негативно впливає на валовий збір сільськогосподарської продукції. Основними причинами втрати працездатного стану РО є знос та зміна геометричних параметрів РЕ (затуплення).

Затуплення РЕ РО ґрунтообробних машин призводить до збільшення витрати пального внаслідок збільшення тягового опору агрегату та погіршення якості виконання технологічних операцій: зменшення глибини обробітку; зменшення відсотку підрізання бур'янів; погіршення подрібнення рослинних рештків тощо. Для забезпечення працездатного стану РО ґрунтообробних машин необхідно, щоб протягом усього терміну експлуатації їх РЕ зберігали форму, яка дозволить якісно виконувати технологічні операції.

Сутність ефекту самозагострювання полягає у вибіркового зношуванні неоднорідного за перерізом лека, за якого зберігається необхідна його форма і різальні властивості [1]. Інше визначення принципу самозагострювання дав А.Ш. Рабінович: лека називається самозагострювальним, якщо в процесі зношування воно зберігає достатню за показниками міцності та зносостійкості товщину різальної кромки і оптимальний профіль, які допустимі для виконання технологічних операцій [2]. Питання реалізації ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин завжди поставало гостро перед дослідниками та практиками, які підвищували їх довговічність та зносостійкість [2 – 14].

Перші самозагострювальні РО ґрунтообробних машин були розроблені у США ще в середині XIX сторіччя [15, 16]. У нашій країні перші фундаментальні дослідження та розробка самозагострювальних РЕ РО були проведені А.Ш. Рабіновичем [2]. На його думку, для досягнення ефекту самозагострювання РЕ необхідно, щоб нижня фаска лемеша була у декілька разів твердішою за верхню. Відповідно до проведених досліджень А.Ш. Рабіновичем введено критерій самозагострювання [2]:

$$\omega = \frac{\varepsilon_2 h_2}{\varepsilon_1 h_1}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_1$ ,  $h_1$  – зносостійкість і товщина наплавленого металу;  $\varepsilon_2$ ,  $h_2$  – зносостійкість і товщина основного металу.

Під час обробітку більшості ґрунтів для лемешів критерій самозагострювання становить  $\omega = 1,5$ . Товщина наплавленого шару, як правило, не повинна перевищувати 2,5 мм, а твердість повинна бути 50...58 HRC [17]. Дане твердження не є актуальним, оскільки твердість РЕ РО ґрунтообробних машин може становити 60 HRC, тому необхідне уточнення отриманої раніше умови [18].

В.М. Ткачовим [1] встановлено чотири умови самозагострювання лемішно-лапових РО:

1. Радіус затуплення  $R_k$  ріжучої крайки в процесі роботи леза не повинен перевищувати допустимого  $R_{к.д.}$ , обумовленого нормальним протіканням технологічного процесу різання робочої маси.

2. Товщина несучого шару  $h_n$  повинна бути мінімально можливою для забезпечення необхідної міцності твердого шару:

$$h_n = h_m K_n, \quad (2)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт міцності твердого шару, який може, залежно від властивостей ґрунту й твердого шару, змінюватися в широкому діапазоні (для лез наплавлених сормайтом  $K_n = 1,0 \dots 1,8$ ).

3. Твердість зносостійкого шару  $H_m$  повинна бути у відповідному співвідношенні із твердістю несучого шару:

$$H_m = K H_n, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від абразивних властивостей ґрунту ( $K = 1,2 \dots 2,8$ ).

4. Зміцнено, як правило, повинна підлягати та грань леза, яка піддається найменшому зношуванню. Якщо ця умова не буде виконуватися, то інтенсивність зношування твердого й м'якого шарів вирівнюється, що неминуче призведе до затуплення леза.

У наукових працях [6, 7] висловлюються сумніви щодо коректності формулювання четвертої умови самозагострювання. При зміцненні поверхні, яка піддається найменшому зношуванню, несучий шар доволі швидко зношується, що призведе до виступу твердого шару. При взаємодії із твердими включеннями в ґрунті такий шар буде обломлюватися. Вибір сторони зміцнення має ґрунтуватися на фізико-механічних властивостях ґрунтів та умовах експлуатації, на це вказують рекомендації різних дослідників щодо вибору сторони зміцнення стрілочатих лап культиватора для досягнення ефекту самозагострювання їх РЕ. Так, у наукових працях [1, 14, 19 – 21] рекомендують наплавляти внутрішню сторону стрілочатої лапи, а в працях [7, 11, 22 – 25] – навпаки, зовнішню. У науковій праці [26] стверджується, що нанесення шару на внутрішню сторону сприяє самозагострюванню і підвищує ресурс стрілочатої лапи на 18% у порівнянні із нанесенням зносостійкого шару на зовнішню сторону. Але дані твердження потребують експериментальних підтверджень, оскільки не можуть базуватися на результатах досліджень проведених в умовах одного типу ґрунту. Моделювання процесу самозагострювання РЕ дозволило встановити, що наявність ефекту самозагострювання можна оцінити кількісно за допомогою безрозмірного критерію самозагострювання [27]:

$$K_c = v_{ик} \sin \beta / (v_{ин} \cos \beta + v_{иф}), \quad (4)$$

де  $v_{ин}$ ,  $v_{иф}$ ,  $v_{ик}$  – відповідно, швидкості лінійного зношування для зміцненої поверхні (покриття), для фаски та крайки РЕ, мм/год.;  $\beta$  – кут загострення, град.

Проведена оцінка показує, що: за значення  $K_c = 1$  спостерігається самозагострювання РЕ; за  $K_c > 1$  – його затуплення; за  $K_c < 1$  – його переагострювання. Останній випадок є небажаним, оскільки оголюється різальний шар, що призводить до обламування різального елемента [27].

У науковій праці [28] відзначається, що явище самозагострювання РЕ можливо тільки для визначеного діапазону співвідношень твердості шарів  $H_1/H_2 = 2,6 \dots 2,9$ . Якщо співвідношення твердості несучого та зміцненого шарів РЕ менше оптимального, тоді відбувається затуплення [28]. Дані твердження не є точними, оскільки твердість не є об'єктивною характеристикою зносостійкості металевих сплавів.

Один із сучасних підходів до проблеми досягнення ефекту самозагострювання РЕ або самоорганізації поверхні РО ґрунтообробних машин є використання при їх проектуванні біологічного прототипу [29 – 31]. На даний час створена ціла наука – біоніка (Bionics), яка використовує біологічні принципи при побудові технологічних систем [32]. У науковій праці [33] відзначається, що ідеальним кінцевим результатом біоніки є створення “живої” машини (“living” machine). Виникнення біоніки дозволило людству перейти від “взяття від природи” до “навчання від природи” [34]. Так, під час проектування самозагострювального інструменту для фінішної токарної обробки, за прототип було взято будову зубів морського їжака та акули [35]. У результаті було досягнуто ефект самозагострювання із набуттям зубчастої поверхні різальної кромки. Автор наукової праці [36] стверджує, що самозагострювання різального інструменту досягається в тому випадку, якщо створені умови сприяють однаковому за величиною зношуванню всієї поверхні інструменту.

Автори наукової праці [29] рекомендують для моделювання РО ґрунтообробних машин використовувати в якості біологічного прототипу риучі кінцівки землерийних комах і тварин, а також мешканців водного середовища. Вважають, що параметри РО ґрунтообробних машин необхідно приймати на основі моделювання із урахуванням біологічного прототипу [29]. Для розроблення самозагострювальних РО ґрунтообробних машин не потрібно буквально копіювати біологічні прототипи, оскільки в живій природі відсутні прототипи, які працюють в ідентичних умовах та режимах і

мають такі ж цілі. При розробці самозагострювальних РЕ РО ґрунтообробних машин необхідно використовувати частково принципи із живої природи та ураховувати досягнення інженерної науки. Найсучаснішим рішенням, що дозволяє досягнути самозагострювання РЕ РО машин або інструментів, є використання “самозагострювальних” (“self-sharpening”) матеріалів [37]. На жаль, у сучасних реаліях використовувати самозагострювальні матеріали (на основі вольфраму) при виробництві РО ґрунтообробних машин є економічно недоцільним у зв’язку із високою їх вартістю.

Під час аналізу наукових праць щодо досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин встановлено:

- більшість наукових праць присвячені вивченню ефекту самозагострювання РЕ лемішно-лапових РО;

- при розробці самозагострювальних РЕ РО ураховано тільки зношувальну здатність ґрунту в одному із його станів і не враховані можливість самоорганізації середовища ґрунту та зміна режимів експлуатації;

- рекомендації досягнення ефекту самозагострювання носять локальний характер, тобто можуть бути використанні тільки за певних умов експлуатації;

- відсутній комплексний теоретичний підхід до розв’язання проблеми забезпечення ефекту самозагострювання РО ґрунтообробних машин.

**Мета дослідження** – створення теоретичних основ та розробка науково обґрунтованих умов для досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин із урахуванням умов та режимів їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені такі задачі:

- розробка теоретичних моделей самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин;

- побудова цільових функцій, пропонування критеріїв оптимальності і розробка методики оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів та геометричних параметрів РЕ РО ґрунтообробних машин;

- запропонування технологічних та конструктивних методів для досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин;
- експериментальне підтвердження теоретичних положень.

### **Матеріали і методи**

Основний метод вирішення поставленої мети – теоретичний, початкові дані якого базуються на масиві експериментальних даних,



накопичених під час розробки і випробування самогострювальних РЕ РО ґрунтообробних машин.

Для підтвердження сформованих теоретичних положень проведені відповідні експлуатаційні дослідження. Дослідження проводили на різних типах ґрунтів в умовах аграрних підприємств Житомирської та Вінницької областей (Україна) у 2016–2018 роках. Поля, на яких проводилися дослідження, були після збирання зернових культур (озима пшениця та ячмінь). Швидкість руху для плуга варіювались в межах 10...13 км/год., для культиватора та дискового агрегату – 11...15 км/год. Масовий знос робочих органів визначався на лабораторних вагах СР 34001 S фірми “Sartorius” (Німеччина).

Дослідженню підлягали найбільш поширені РО ґрунтообробних машин: леміш, стрілочата лапа культиватора та дисковий робочий орган (типу “ромашка”). РО ґрунтообробних машин були виготовлені зі сталей 65Г, Л53, Hardox 500, 28MnB5 та зміцнені ручним наплавленням електродами Т-590, Т-620 і М-Fe6. РО виготовлені зі сталі 65Г піддавалися об’ємному загартуванню за температури +810...830°C та середньому відпуску із дуже точною витримкою за температури +460...480°C. Дослідження процесу зношування РО, які виготовлені зі сталі Л53, Hardox 500 та 28MnB5, проводили без зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

### Результати дослідження та обговорення

Алгоритм послідовності розробки теоретичних основ забезпечення самогострювання РЕ РО ґрунтообробних машин представлено на рис. 1. У результаті аналізу початкових даних та цільових функцій були сформовані критерії оптимізації. У процесі теоретичних досліджень етапи системного аналізу та оптимізація розглянуті детально, а синтез – із точки зору загального підходу.

Форма РЕ РО ґрунтообробних машин має забезпечувати виконання технологічних операцій, зумовлюючи при цьому якомога менший опір. Визначення форми твердого тіла, що здійснює опір потоку, є класичною задачею варіаційного обчислення [17]. Розв’язуючи рівнянні Ейлера, визначимо оптимальний кут різання ґрунту:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{3}{2} f \pm \sqrt{\frac{9}{4} f + 2}, \quad (5)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Провівши розрахунки автор наукової праці [36] прийшов до висновку, що оптимальний кут різання  $\alpha$  повинен бути в межах 39,3...52,7°.

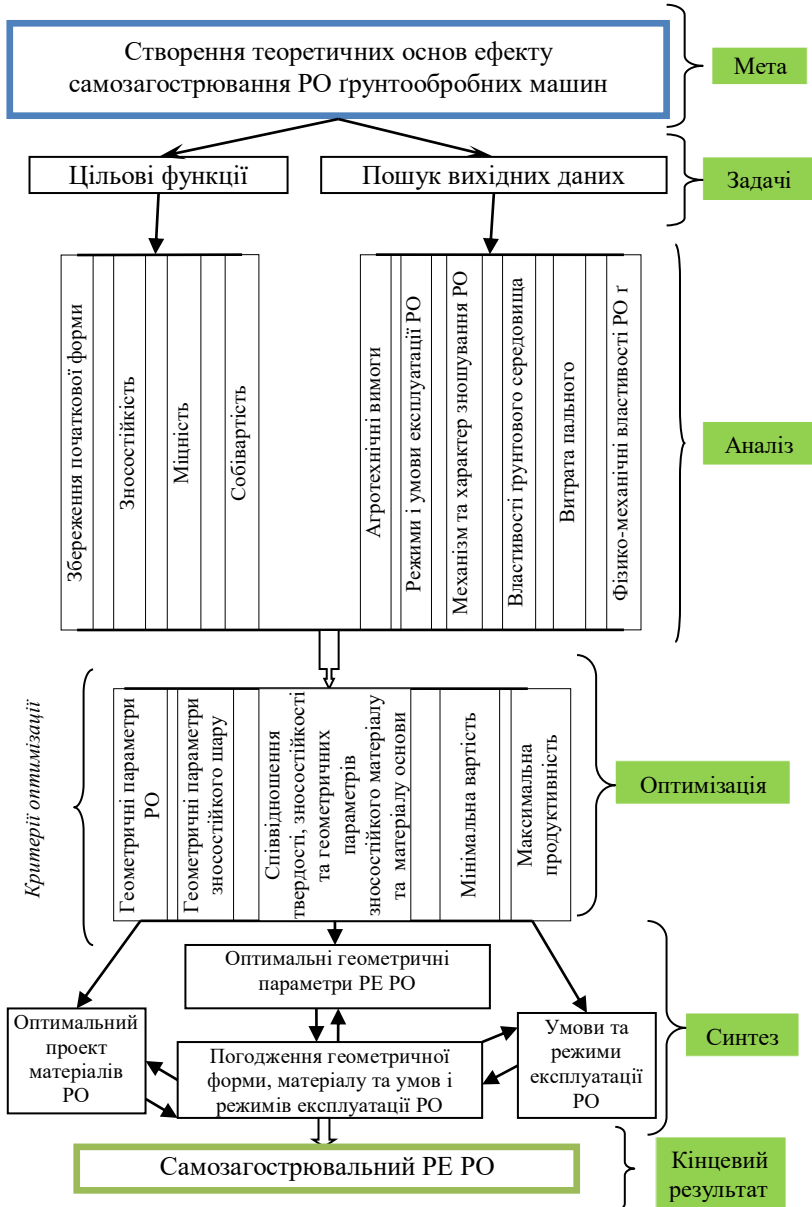


Рис. 1 – Алгоритм розробки самозагострювального PE РО

Це твердження узгоджується із дослідженнями А.Ш. Рабіновича [2], який встановив, що в результаті зношування РЕ кут утворений на лицевій поверхні лемеша має нахил до горизонту  $48,0...52,5^\circ$ .

Ці розрахунки базувалися на врахуванні тільки коефіцієнта тертя-ковзання. За взаємодії РО із ґрунтом на його поверхні одночасно відбуваються три види тертя: тертя-ковзання, тертя-кочення та тертя-кочення із проковзування. Якщо великий ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті, то тертя-ковзання переважає всі інші види тертя. При знаходженні ґрунту в пухкому стані перевага тертя-ковзання не настільки суттєва і нехтувати іншими видами тертя недоцільно. Зазначимо, що під час проєктування РО ґрунтообробних машин необхідно урахувати цю обставину.

Теоретично визначити оптимальних кут різання для різних станів ґрунту є складним завданням. Саме тому, проведено аналіз зношених РО, які працювали на різних типах ґрунтів і в різних станах (таблиця 1) та визначено кути, які утворюються в ріжучій частині РО (рис. 2 – 4).

Таблиця 1 – Кут загострення, який утворюється в результаті зношування серійних монометалевих РО ґрунтообробних машин

Робочий орган	Кут загострення, град					
	Супіщаний	Супіщаний (пухкий ґрунт)	Середній суглинок	Середній суглинок (пухкий ґрунт)	Глина легка	Глина легка (пухкий ґрунт)
Леміш (лезова частина)	26...35	-	32...48	-	52...70	-
Долото лемеша (змінне)	47...51	-	49...57	-	58...79	-
Стрілчата лапа (крила, перший ряд)	17...21	16...19	23...25	22...23	31...38	27...31
Дисковий робочий орган (тип "ромашка", перший ряд)	27...31	26...30	33...35	30...34	36...41	32...36

Кут загострення, який утворився в результаті зношування (природній кут), відрізняється за всією довжиною леза (рис. 2, рис. 3). Це можна пояснити зміною величини тиску абразивної маси на різні

частини леза. Під час розробки самогострювального РЕ РО цю закономірність (рис. 4) необхідно урахувати при обґрунтуванні співвідношення між параметрами зносостійкого шару та основного металу.



Рис. 2 – Формоутворення РЕ змінного долота лемеша (експлуатація на супіщаних ґрунтах)



Рис. 3 – Формоутворення РЕ леза лемеша (експлуатація на легкій глині)



Рис. 4 – Зміна кута загострення РЕ лезової частини лемеша за експлуатації на різних типах ґрунтів (точки *A, B, C, D* – місця проведення замірів)

У результаті експлуатації на піщаних та супіщаних ґрунтах виявлено, що РЕ РО ґрунтообробних машин, які виготовлені із матеріалу без нанесення зносостійкого покриття (одношарові), здатні до самогострювання (рис. 2). На більш важких ґрунтах (суглинках та глинах) спостерігається затуплення РЕ РО ґрунтообробних машин (рис. 3). Для інших типів РО ґрунтообробних машин спостерігається подібна закономірність зміни кута загострювання за довжиною різальної кромки залежно від типу ґрунту.

Досягнення форми природного зношування не завжди призводить до зменшення тягового опору агрегату, і, відповідно, до зменшення витрати пального (рис. 5). На рис. 5 результати представлені у відсотковому значенні, оскільки обробіток ґрунту проводився різними агрегатами. За 100% взято витрату пального при експлуатації агрегату з новими РО.

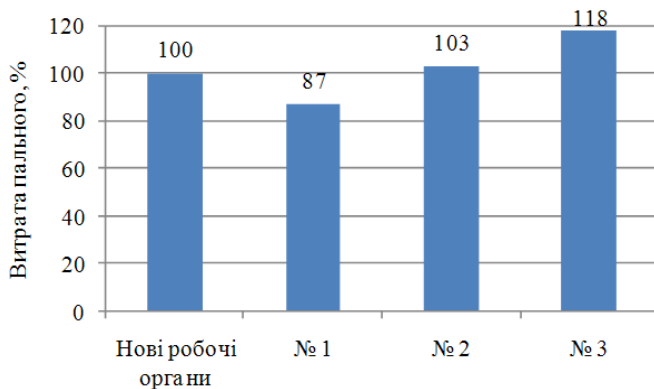


Рис. 5 – Зміна витрати пального при початковій формі і при досягненні форми природного зношування в процесі експлуатації для одношарових лемешів, які виготовлені зі сталі Hardox 500: №1 – на супіщаних ґрунтах; №2 – на суглинкових ґрунтах; №3 – на легкій глині

Як відомо із праці [6], для РО ґрунтообробних машин можливе існування двох закономірностей зношування (рис. 6). Із рис. 6 очевидно, що на піщаних та супіщаних ґрунтах зношування призводить до самоорганізації РО, яке сприяє процесу самогострювання, що, в свою чергу, призводить до зменшення витрати пального при обробітку ґрунту. На суглинкових та глиняних ґрунтах природна форма зношування призводить до затуплення лезової частини і зростання витрати пального. Саме тому, розробка самогострювальних РЕ РО для цих типів ґрунтів є найбільш актуальною. Для піщаних та супіщаних ґрунтів необхідно розробити заходи із підвищення зносостійкості зі збереженням природної форми зношування, а для суглинкових і глиняних ґрунтів треба розробити заходи, які дозволять керувати процесом зношування із можливістю досягнення ефекту самогострювання.

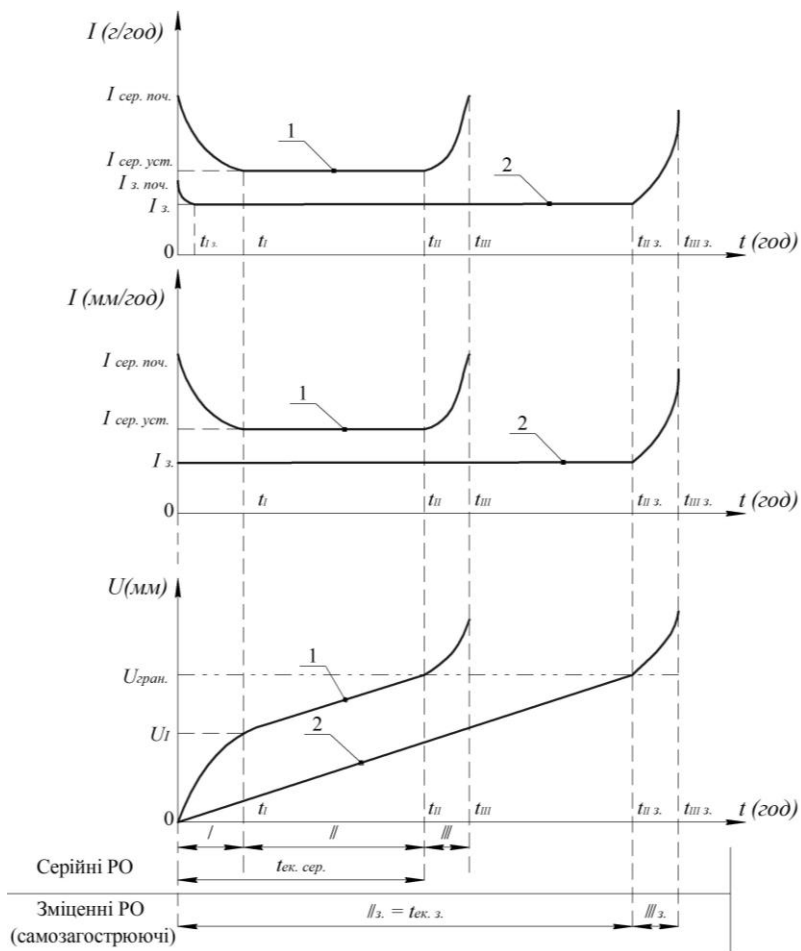


Рис. 6 – Типові криві зміни зносу та швидкості зношування РО ґрунтообробних машин із часом: 1 – серійні РО; 2 – зміцнені (здатні до самоорганізації) РО;  $I$  (мм/год.),  $I$  (г/год.) – відповідно, інтенсивність лінійного і масового зношування;  $U$  – масовий знос;  $I$  – період самоорганізації;  $II$  – період встановленого зношування;  $III$  – період критичного зношування;  $t$  – час зношування

Для серійних РО початковий етап експлуатації характеризується наявністю невстановленого перехідного режиму із високою початковою швидкістю (відрізок  $I$ , рис. 6). Тривалість початкового

періоду залежить від абразивних властивостей ґрунтів. Так, на піщаних і супіщаних ґрунтах період перехідного режиму (самоорганізації РО) проходить набагато швидше, ніж на суглинкових і глинистих ґрунтах. Після періоду самоорганізації настає період встановленого зношування (відрізок II, рис. 6), коли  $I_{сер.уст} = const.$  (мм/год., г/год.) та  $I = const.$  (г/год.). Після закінчення періоду встановленого зношування швидкість зношування суттєво зростає. У більшості випадків після закінчення другого періоду РО ґрунтообробних машин вибраковуються, оскільки вони перестають виконувати агротехнічні вимоги. Швидкий знос пов'язаний із зменшенням товщини різальної кромки та “втомою” матеріалу РО, що зумовлює його обломлювання або надщерблення (рис. 7).



Рис. 7 – Обломлювання носка стрілочної лапи культиватора

Період III дуже чітко спостерігається для дискових РО та стрілочних лап культиваторів і майже відсутній для лемешів і долота лемеша. Розглянемо криві 1 та 2 (рис. 6) без зон III і III<sub>з</sub>. Порівнюючи функції зносу серійних та зміцнених (самозагострювальних) РО бачимо, що на початковому проміжку  $[0; t_1]$ :

1) функція зносу серійних РО має нелінійний характер і описується залежністю:

$$U(t) = U_0 + \alpha t^\beta, \quad (6)$$

де  $U_0$  – початковий знос;  $\alpha, \beta$  – параметри,  $\alpha \in (0; n)$  і  $\beta \in (0; 1)$ ;

2) функція зносу зміцнених РО має лінійний характер і описується залежністю (без урахування зони III):

$$U(t) = U_0 + \gamma t, \quad (7)$$

де  $U_0$  – початковий знос;  $\gamma$  – параметр,  $\gamma \in (0; t_{II.з.})$ , що дорівнює куту нахилу прямої (для проміжку  $[0; t_{II.з.}]$ ).

Із урахуванням зони III, маємо:

$$U(t) = \begin{cases} U_0 + \gamma t, t \in [0; t_{II.3.}]; \\ U_0 + at^2 + bt + c, t \in [t_{II.3.}; t_{III.3.}]. \end{cases} \quad (8)$$

Параметр  $\gamma$  можна знайти із залежності (8):

$$\gamma = \frac{at_{II.3.}^2 + bt_{II.3.} + c}{t_{II.3.}^2}. \quad (9)$$

Відхилення функції зносу серійних і зміцнених РО ґрунтообробних машин оцінимо площею складної фігури, що утворена кривими в інтервалі  $[0; t_1]$ :

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{t_1} (U_0 + \alpha t^\beta - U_0 - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} (\alpha t^\beta - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} \alpha t^\beta dt - \int_0^{t_1} \gamma t dt = \\ &= \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta+1} \Big|_0^{t_1} - \frac{\gamma t^2}{2} \Big|_0^{t_1} = \frac{\alpha t_1^{\beta+1}}{\beta+1} - \frac{\gamma t_1^2}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

де  $t_1$  – час, після якого функція зносу серійних РО набуває лінійного характеру, с.

Для досягнення ефекту самозагострювання залежність лінійного зносу РО від часу повинна мати вигляд кривої 2 (рис. 6). Це обумовлює проведення зміцнення однієї із сторін РО із забезпеченням початкової форми кромки РЕ, яка буде підтримуватися протягом всього терміну експлуатації. Із математичної точки зору для досягнення ефекту самозагострювання серійних РО необхідно розробити заходи, які дозволять досягнути  $S \rightarrow 0$ , а для підвищення довговічності РО необхідно, щоб параметр кривої 2 (рис. 6)  $\gamma \rightarrow \min$ . Період припрацювання  $t_{1.3.}$  для даних РО характеризується більш інтенсивним масовим зношуванням і відсутністю такої закономірності для лінійного зношування (рис. 6). Зміни закономірності зношування серійних РО (крива 1) на закономірність самозагострювальних РО (крива 2) можна досягти за рахунок регулювання фізико-механічних властивостей матеріалу поверхонь РО із урахуванням особливостей характеру зношування залежно від абразивних властивостей ґрунтів та режимів експлуатації.

При проектуванні самозагострювальних РЕ РО одним із основних показників є співвідношення зносостійкості матеріалів РО та їх геометричних характеристик.

Для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівності РО співвідношення зносостійкості та товщини основного металу і зносостійкого шару повинно відповідати значенням, які визначені у працях [1, 2, 6] відповідно до критерію,



запропонованого А.Ш. Рабіновичем. Так, у праці [38] вказано, що для більшості ґрунтів  $\omega = 1,5$ . На основі аналізу зношених РО, аналізу попередніх досліджень та практичного досвіду встановлено критерій  $\omega$  для різних типів РО ґрунтообробних машин із урахуванням умов експлуатації (таблиця 2).

Таблиця 2 – Критерій самозагострювання  $\omega$   
(визначений експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій $\omega$		
		Леміш	Стрілчата лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	поле після збирання с/г культур	1,6...1,7	1,5...1,6	1,9...2,0
	пухкий ґрунт	-	1,3...1,4	1,3...1,4
Середній суглинок	поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,4...1,5	1,9...2,0
	пухкий ґрунт	-	1,25...1,35	1,4...1,5
Глина легка	поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,35..1,45	1,8...1,9
	пухкий ґрунт	-	1,2...1,3	1,45...1,55

Для лемешів не визначали критерію самозагострювання  $\omega$  при експлуатації на пухких ґрунтах, оскільки вони не працюють у таких умовах. Зі зменшенням абразивності ґрунту та ступеня закріплення абразивних частинок в ґрунті спостерігається зменшення критерію  $\omega$  для всіх типів РО ґрунтообробних машин (таблиця 2).

Для дискових РО даний критерій  $\omega$  суттєво більший, що пов'язано, у першу чергу, із наявністю динамічних навантажень при роботі на твердих ґрунтах. Даний результат підтверджено суттєвим зменшенням критерію  $\omega$  при зменшенні ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті, а отже і його твердості. За наявності кам'янистих включень у ґрунті, критерій  $\omega$  повинен бути суттєво збільшений, що унеможливить обломлювання РЕ РО. У класичному розумінні, це співвідношення повинно відповідати залежності (1) за всією поверхнею РЕ РО. Ця залежність не розкриває повною мірою процеси самоорганізації РО ґрунтообробних машин, оскільки не враховує особливості зношування складових частин РО. Це співвідношення

повинно забезпечувати не тільки можливість самогострювання РЕ РО, але і забезпечити рівностійкість зношування РО. В основі запропонованих співвідношень зносостійкості і товщини нанесених зносостійких шарів РО лежать експериментальні дослідження характеру зношування РО ґрунтообробних машин залежно від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

На рис. 8 зображено зони нанесення зносостійкого покриття на поверхню РО ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самогострювання та рівностійкості: 1 – зона, яка найбільш інтенсивно зношується; 2 – зона із меншою інтенсивністю зношування. Цей розподіл не є оптимальним, наприклад, леміш плуга більш доцільно поділити на чотири зони, але такий поділ ускладнить, а в деяких випадках унеможливить процес нанесення зносостійкого шару в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств.

Зону 2 (рис. 8) для лемешів і культиваторних лап можливо зміцнювати точково для утворення зубчастої поверхні. Форма такої поверхні сприяє якісному виконанню технологічної операції і зумовлює зменшення тягового опору на 3,2...6,4%, але, разом з тим, зменшує зносостійкість на 8,1...14,5 %. При використанні лемешів зі змінним долотом зона 1 (рис. 8) не зміцнюється.

Для досягнення ефекту самогострювання РЕ РО та рівностійкості зношування необхідно, щоб параметри зносостійкого шару мали співвідношення:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{1z} \cdot h_{1z}}{\varepsilon_{2z} \cdot h_{2z}}, \quad (11)$$

де  $\varepsilon_{1z}$  – зносостійкість зміцнювального покриття зони 1 (рис. 8);  $\varepsilon_{2z}$  – зносостійкість зміцнювального покриття зони 2 (рис. 8);  $h_{1z}$  – товщина зміцнювального покриття зони 1 (рис. 8), мм;  $h_{2z}$  – товщина зміцнювального покриття зони 2 (рис. 8), мм.

Значення критерію  $\chi$ , що характеризує співвідношення між параметрами зносостійкого шару, визначено для різних типів ґрунтів із урахуванням їх стану (таблиця 3). Швидкість руху ґрунтообробного агрегату суттєво впливає на характер зношування РО ґрунтообробних машин, а отже і на співвідношення параметрів зносостійкого шару в різних зонах РО. Дослідження критерію  $\chi$  проведені на агрегатах, які працювали в діапазоні швидкостей 10...11 км/год. За подальшого зростання швидкості необхідно вводити поправочний коефіцієнт  $\Omega$ :

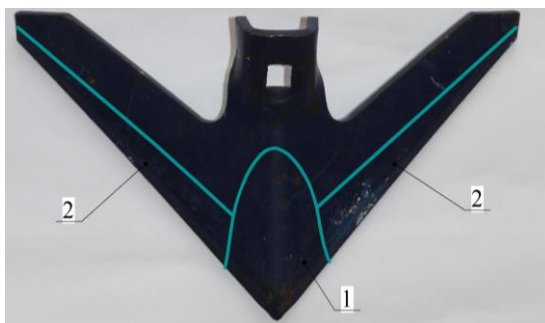
$$\Omega = (V_{роб} - V_{поч}) \times \beta, \quad (12)$$

де  $V_{роб}$  – робоча швидкість агрегату, км/год.;  $V_{поч}$  – початкова швидкість агрегату ( $V_{поч} = 11$  км/год.), км/год.;  $\beta$  – поправочний

коефіцієнт, який враховує зростання інтенсивності зношування зони 1 (рис. 8) за зростання швидкості руху агрегату (для супіщаних і піщаних ґрунтів –  $\beta \approx 1,03$ , для суглинків –  $\beta \approx 1,025$  та для глиняних ґрунтів –  $\beta \approx 1,012$ ).

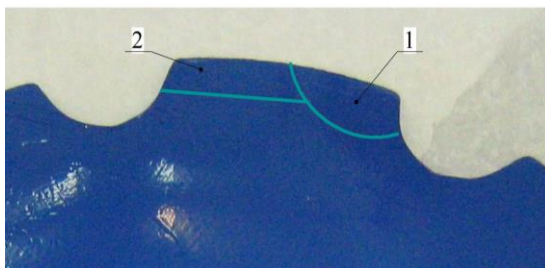


а



б

Напрямок обертання дискового РО



в

Рис. 8 – Схеми нанесення зносостійкого покриття на РЕ РО для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівності зношування:  
а – леміш; б – стрілочка лапа; в – дисковий РО:  
1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару

Таблиця 3 – Співвідношення між параметрами зносостійкого шару  $\chi$  (визначено експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій $\chi$		
		Леміш	Стрілчата лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	поле після збирання с/г культур	1,50...1,60	1,20...1,30	1,10...1,15
	пухкий ґрунт	-	1,05...1,15	1,05...1,10
Середній суглинок	поле після збирання с/г культур	2,25...2,35	2,45...2,55	1,90...2,00
	пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,50...1,60
Глина легка	поле після збирання с/г культур	2,35...2,45	2,40...2,50	2,10...2,15
	пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,55...1,65

Початковий кут загострення РО ґрунтообробних машин суттєво впливає не тільки на реалізацію ефекту самозагострювання, а також впливає і на довговічність РО. Проведений аналіз дослідних робіт та синтез їх з отриманими даними експлуатаційних досліджень дозволили встановити оптимальні кути загострення РО ґрунтообробних машин. Для лемешів оптимальний кут загострення лезової частини знаходиться в межах  $8...10^\circ$ , а носової частини –  $20...27^\circ$ . Для стрілчатих лап оптимальний кут загострення лезової частини  $8...10^\circ$ , а носової частини –  $25...30^\circ$ . Для дискового робочого органу оптимальний кут загострення –  $28...34^\circ$ . При зміцненні стрілчатої лапи із зовнішньої сторони, загострення крил лапи проводили із внутрішньої сторони. Загострення у всіх випадках проводили одностороннє.

В аналізі приведено суперечливі дані щодо сторони нанесення (зовнішню чи внутрішню) зносостійкого матеріалу на стрілчатую лапу, тому для проведення експериментальних досліджень лапи виготовлялися із внутрішнім і зовнішнім нанесенням зносостійкого покриття.

У результаті проведених експлуатаційних досліджень у всіх РО, які були виготовлені за рекомендаціями представленими в теоретичних досліджень, спостерігався ефект самозагострювання. Під час експлуатації стрілчатих лап із внутрішнім зносостійким шаром на

супіщаних та суглинкових ґрунтах спостерігався виступ зміцненого шару, що зумовило його обломлювання при взаємодії із твердими включеннями у ґрунті. Довговічність таких лап на цих ґрунтах була в 1,6..1,9 разів меншою, ніж серійних. На глинистих ґрунтах лапи із внутрішнім зносостійким шаром демонстрували ефект самозагострювання, а довговічність їх була на 2,8% більшою за лапи із зовнішнім зносостійким шаром.

Процес самоорганізації (самозагострювання) РО, який був досягнутий за рахунок нанесення зносостійкого шару, дозволив суттєво зменшити витрату пального за експлуатації на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних та піщаних ґрунтах порівняно із використанням серійних РО (рис. 9).

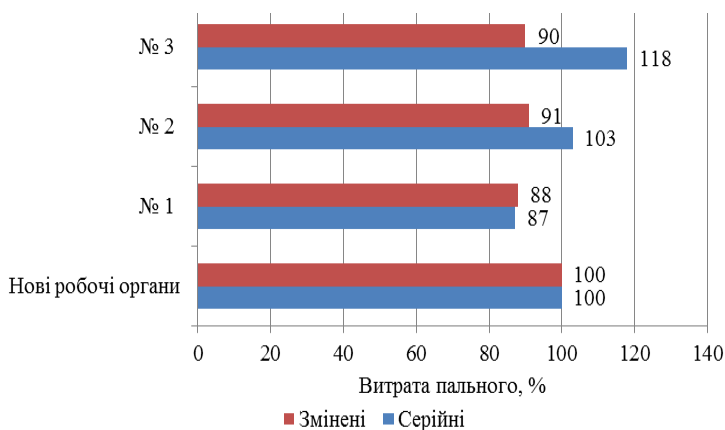


Рис. 9 – Зміна витрати пального при початковій формі і при досягненні форми природного зношування (для серійних) або процесу самозагострювання (для зміцнених) РО ґрунтообробних машин:

№1 – за експлуатації на супіщаних ґрунтах; №2 – за експлуатації на суглинкових ґрунтах; №3 – за експлуатації на легкій глині

Використання зміцнених РО ґрунтообробних машин із ефектом самоорганізації (самозагострювання) дозволяє підвищити довговічність РО, покращити якість та зменшити собівартість технологічної операції.

### Висновки

На основі аналізу апріорної інформації, проведених теоретичних та експлуатаційних досліджень встановлені оптимальні параметри РО ґрунтообробних машин, які дозволяють реалізувати ефект

самозагострювання із урахуванням умов та режимів експлуатації. Проведені експлуатаційні випробовування підтвердили ефективність застосування розроблених параметрів РО ґрунтообробних машин для реалізації ефекту самозагострювання.

Одержані результати теоретичних досліджень та експлуатаційних випробувань дозволяють впроваджувати самозагострювальні РЕ РО в аграрних підприємствах із урахуванням особливостей експлуатації та типів ґрунтів.

#### Список посилань

1. Ткачев, В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1971. – 272 с.
2. Рабинович, А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин / А. Ш. Рабинович. – М. : ГОСНИТИ, 1962. – 165 с.
3. Аулін, В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія / В. В. Аулін, А. А. Тихий. – Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2017. – 278 с.
4. Новиков, В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин : монография / В. С. Новиков. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 155 с.
5. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М. М. Севернев, Н. Н. Подлекарев, В. Ш. Сохадзе; под. ред. М. М. Севернева. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 333 с.
6. Борак, К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Борак Костянтин Вікторович; Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2013. – 217 с.
7. Бобрицький, В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Бобрицький Віталій Миколайович; Національний транспортний університет. – К., 2007. – 182 с.
8. Ткачев, В. Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1995. – 336 с.
9. Денисенко, М. І. Зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання / М. І. Денисенко, В. Д. Войтюк // Технічний

- сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2016. – №36. – С. 175–182.
10. Аулін, В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Аулін Віктор Васильович; Хмельницький національний університет. – Хмельницький, 2015. – 447 с.
  11. Виноградов, В. В. Повышение износостойкости стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Виноградов Виктор Владимирович. – Орел, 2017. – 156 с.
  12. Zhang, J. Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges / J. Zhang, R. L. Kushwaha // Canadian Agricultural Engineering. – 1995. – Vol. 37 (1). – P. 41–47.
  13. Par, B. Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding / B. Par // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.10.003>
  14. Михальченков, А. М. Стрелчатая лапа культиватора повышенной износостойкости с эффектом самозатачивания / А. М. Михальченков, С. И. Будко, Л. С. Киселева // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Кокино, 2011. – С. 101–103.
  15. Gear, G. U. States agricultural warehouse / G. Gear, R. Wheels // The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series. – 1947. – Vol. IV. – P. 231.
  16. Wilson, E. Steel cultivators. / E. Wilson // The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series. – 1948. – Vol. V. – P. 165.
  17. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструментов / В. В. Шульц. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 208 с.
  18. Борак, К. В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. / К. В. Борак // Біоресурси і природокористування. – 2020. – Том 12 (1–2). – [Електронний ресурс]. Режим доступу до журн. : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/13870>

19. Ахметшин, Т. Ф. Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов / Т. Ф. Ахметшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – Оренбург, 2013. – С. 81–84.
20. Люляков, И. В. Разработка технологии восстановления стрельчатых лап культиваторов путем замены режущей части : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Люляков Иван Викторович. – Саратов, 2005. – 192 с.
21. Виноградов, В. В. Восстановление и упрочнение стрельчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами / В. В. Виноградов // Молодежь и XXI век – 2016 : Материалы VI Международной молодежной научной конференции. – Курск, 2016. – С. 89–94.
22. Козаченко О. В. Польові випробування удосконалених культиваторних лап / О. В. Козаченко, О. М. Шкрегаль, В. С. Каденко, О. В. Блезнюк // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2019. – №15. – С. 31–39.
23. Собачкин, А. В. Формирование износостойких покрытий для деталей сельскохозяйственного машиностроения при электродуговой наплавке многокомпонентных механо-активированных СВС-материалов : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.09 – “Материаловедение (в машиностроении)” / Собачкин Алексей Викторович; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2013. – 150 с.
24. Шамшетов, С. Н. Повышение долговечности рабочих органов культиваторов для междурядной обработки хлопчатника : автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Шамшетов Сарсенбай Нуратдинович. – Москва, 1985. – 20 с.
25. Аулін, В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах : монографія / В. В. Аулін. – Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. – 369 с.
26. Новиков, В. С. Повышение долговечности стрельчатых лап культиваторов / В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Весник ФГОУВПО “Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина”. – 2017. – №4. – С. 49–55.



27. Аулін, В. В. Самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних і землерийних машин в умовах зміцнення їх робочих поверхонь / В. В. Аулін, С. О. Карпушин, А. А. Тихий // *Весник ХНАДУ*. – 2012. – Вып. 57. – С. 188–194.
28. Гончаров, В. С. Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания / В. С. Гончаров, П. А. Мельников, А. Н. Попов, Е. В. Васильев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Самара, 2013. – С. 233–235.
29. Бабицкий, Л. Ф. Развитие бионического направления в земледельческой механике / Л. Ф. Бабицкий, В. Ю. Москалевич, И. В. Соболевский // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – Киров, 2017. – №4 (59). – С. 68–74.
30. Волик, Б. А. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин / Б. А. Волик, Є. І. Лепеть, А. В. Коновий // *Інженерія природокористування*. – Харків, 2018. – №2. – С. 45–48.
31. Бабицкий, Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин / Л. Ф. Бабицкий. – Київ : Урожай, 1998. – 162 с.
32. Ren, L. Q. Preliminary studies on the basic factors of bionics / L. Q. Ren, Y. H. Liang // *Science China Technological Sciences*. – 2014. – P. 520–530. <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5449-1>
33. Bogatyrev N. R. A “Living” Machine / N. R. Bogatyrev // *Journal of Bionics Engineering*. – 2004. – Vol. 1(2). – P. 79–87. <https://doi.org/10.1007/BF03399464>
34. Yongxiang, L. Significance and Progress of Bionics / L. Yongxiang // *Journal of Bionics Engineering*. – 2004. – Vol. 1(1). – P. 1–3. <https://doi.org/10.1007/bf03399448>
35. Jiang, W. Bio-inspired self-sharpening cutting tool surface for finish hard turning of steel / W. Jiang. // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63. – P. 517–520. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.047>
36. Гусев, С. В. Теоретическое обоснование эффекта самозатачивания / С. В. Гусев, А. С. Гусев // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – Владимир, 2011. – №3. – С. 44–47.
37. Liuabc, X. F. Self-sharpening” tungsten high-entropy alloy / X. F. Liuabc, Z. L. Tian, X. F. Zhang, H. H. Chen, T. W. Liu, Y. Chen, Y. J. Wang, L. H. Dai // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 186. – P. 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.005>
38. Востановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов; Под ред. В. П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

---

**RESEARCH OF PASSIVE TYPE POTATO PLANTER****V. Didukh, V. Tarasyuk, D. Tarasyuk**Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---

**Key words:**

planting,  
potato planter,  
potato seeds,  
cascade,  
gravitational  
forces

**Article history:**

Received 28.03.2020

Accepted 15.05.2020

**Corresponding author:**

Didukh\_V@ukr.net

**ABSTRACT**

*The design of passive type potato planter is proposed in the article. Also, the results of theoretical studies of the potato seeds movement on planter trays with straight and curved sections are presented in the article. The conditions of dispersal and deceleration of individual potatoes taking into account the gravitational forces are determined. Planting machines are the main elements of the potato planter. Using of gravity forces during the movement of potatoes in the planting machine can simplify the planter design. Proposed planter design will abandon the traditional drive devices, which in most cases injure potatoes and significantly simplify their design. Therefore, ensuring the accuracy of potato seed supply to the field surface depends on the conditions of separation of individual potatoes in the process of moving from the hopper to the cutter, which connected to the support wheels of the potato planter as a drive mechanism of all elements of the planter. The geometric shape and weight of the potato seeds must be taken into account when the parameters of the potato planter are determined. Because the potato travel time from the planter hopper to the soil surface depends on the speed and acceleration of the potato seed. Implementation of research results will ensure the high quality of the potato seeds planting process.*

---

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.297>

---

УДК 631.332

**ДОСЛІДЖЕННЯ САДИЛЬНОГО АПАРАТУ КАРТОПЛІ ПАСИВНОГО ТИПУ****В.Ф. Дідух, В.В. Тарасюк, Д.В. Тарасюк**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*У статті запропонована конструкція садильного апарату картоплі пасивного типу і представлені результати теоретичних досліджень руху насіння картоплі сферичної форми каскадами із прямолінійними і криволінійними поверхнями. Визначено умови пришвидшення та сповільнення окремих картоплин із урахуванням сил гравітації. Вирощування картоплі в індивідуальних господарствах та зміна кліматичних умов вимагають напрацювання нових підходів при вирощуванні картоплі, застосування нетрадиційних технологій та створення принципово нових, конструктивно простих технічних засобів для садіння картоплі. Основним функціональним вузлом картоплесаджалок є садильний апарат, спрощення конструкції якого можливе за рахунок використання сил гравітації для переміщення картоплі. Такий підхід дозволяє відмовитись від традиційних приводних садильних апаратів, які у більшості випадків травмують картоплини, та суттєво спростити конструкцію картоплесаджалки. Забезпечення точності подачі насіння картоплі на поверхню поля залежить від умов відокремлення окремих бульб у процесі переміщення від бункера до відсікача, який кінематично з'єднаний із опорно-ходовими колесами картоплесаджалки, які приводять у рух всі елементи садильного апарату. Визначальними параметрами, які впливають на переміщення насіння картоплі апаратом пасивного типу, є геометрична форма та маса бульб, від яких залежать час проходження шляху від бункера до поверхні ґрунту, тобто швидкість та прискорення бульб.*

**Ключові слова:** садіння, картоплесаджалка, насіння картоплі, каскад, сили гравітації.

**Стан питання та постановка проблеми**

Українськими виробниками техніки для агропромислового комплексу налагоджено випуск простих за конструкцією дворядних картоплесаджалок продуктивністю від 0,2 га/год. до 0,35 га/год., які забезпечують висаджування картоплі в агротехнічні терміни на площі до 20 га. Ці картоплесаджалки призначені для садіння непророщених

відкаліброваних бульб. Усі картоплесаджалки аналогічні за конструкцією і містять раму, бункер у вигляді перевернутої зрізаної піраміди, ланцюгово-ложковий садильний апарат, механізми приводу і навіски, сошники, підгортачі, опорно-приводні колеса, механізми регулювання робочих органів. Привод садильного апарата здійснюється від опорно-приводних коліс через ведучу зірочку, яка змонтована на осі коліс.

Для контролю якості виконання технологічного процесу, такі картоплесаджалки потребують додаткових працівників, кількість яких залежить від кількості садильних апаратів [1, 2]. Використання ланцюгово-ложкових апаратів у закордонних картоплесаджалках передбачає встановлення на них додаткових технічних елементів, що значно ускладнюють конструкцію машини [3]. Тому, розробка садильного апарату пасивного типу, який можна було б використовувати у картоплесаджалках різної рядності, має передбачати підвищення якості виконання процесу переміщення бульб від бункера до поверхні поля без додаткового обслуговування апарату працівниками. Один із напрямів підвищення якості виконання процесу подачі картоплі на поверхню поля та спрощення конструкції садильного апарату – це використання сил гравітації для переміщення бульб із урахуванням їх фізико-механічних властивостей та конструктивних параметрів садильного апарату пасивного типу.

**Мета дослідження** – дослідити переміщення бульб сферичної форми каскадами садильного апарату картоплі пасивного типу із прямолінійною та криволінійною поверхнями.

### **Матеріали і методи**

Для математичного опису процесу руху насіння картоплі каскадами садильного апарату із прямолінійними та криволінійними поверхнями використовували методи теоретичної механіки, зокрема, які описують переміщення твердих тіл під дією сил гравітації. Оцінку впливу конструктивних параметрів садильного апарату пасивного типу на якість виконання процесу переміщення бульб до відсікача апарата проводили графоаналітичним методом.

### **Результати дослідження та обговорення**

Один із напрямів збереження якості насіння картоплі при виконанні технологічного процесу садіння – це зменшення активної дії на бульби робочих органів під час їх переміщення з бункера до поверхні поля, що забезпечується встановленням додаткових технічних елементів у конструкції садильних апаратів та виготовленням контактних поверхонь пружними або еластичними [3]. Такі рішення значно

ускладнюють конструкцію садильних апаратів та картоплесаджалок у цілому. Найбільш перспективним напрямом у вирішенні посталої проблеми є використання сил гравітації, які діють на бульбу після її виокремлення у бункері від загальної маси. Сили гравітації широко використовуються у різних сільськогосподарських машинах для переміщення сипких матеріалів із урахуванням їх фізико-механічних властивостей. У цих машинах, у переважній більшості, не витрачається електроенергія на привод робочих органів чи поверхонь [4 – 6]. Для садіння картоплі пропонується конструкція садильного апарату пасивного типу (рис. 1), в якому використовуються сили гравітації для переміщення картоплі. Цей апарат містить корпус, в якому розташовані два каскади: каскад розгону із прямолінійною ділянкою, каскад сповільнення із криволінійною ділянкою. Каскади виконані у вигляді лотків напівциліндричної форми у перерізі.

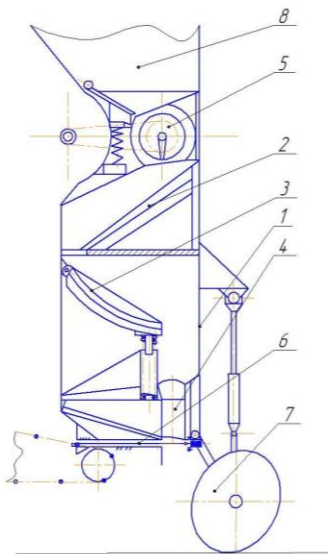


Рис. 1 – Схема садильного апарату картоплі пасивного типу:

- 1 – корпус;
- 2 – каскад розгону;
- 3 – каскад сповільнення;
- 4 – вловлювач;
- 5 – бункерний відокремлювач;
- 6 – відсікач;
- 7 – дисковий загортач рядка;
- 8 – бункер картоплі

Поштучне виокремлення бульб у бункері картоплі забезпечує відокремлювач, а їх вкладання на поверхню поля – вловлювач із

відсікачем, який кінематично з'єднаний як з відокремлювачем, так і з опорно-ходовими колесами. Функцію закриття бульб ґрунтом та формування гребеня виконує загортач.

Серед вказаних конструктивних елементів садильного апарату важливу функцію переміщення насіння картоплі виконують каскади розгону та сповільнення. Від правильного їх розташування та геометричних параметрів залежить рівномірність надходження бульб у вловлювач. Із певними допущеннями кочення насіння картоплі сферичної форми можна розглядати як рух твердого тіла похилими поверхнями (рис. 2) [6, 7].

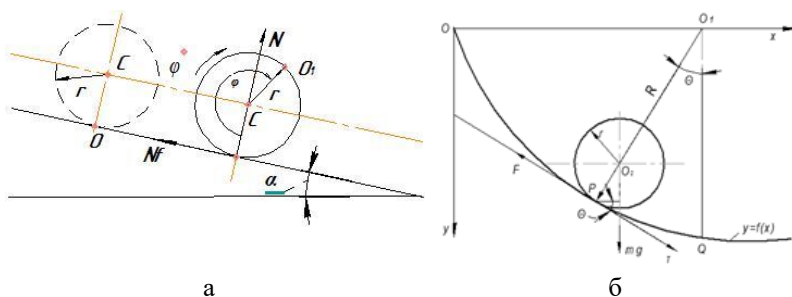


Рис. 2 – Схеми до пояснення руху насіння картоплі сферичної форми робочими поверхнями садильного апарату пасивного типу:  
а – каскад розгону; б – каскад сповільнення

За режиму чистого кочення тіл сферичної форми для їх прискорення використовують похилі прямолінійні поверхні (рис. 2, а). При цьому мають виконуватись умови:

- похила площина абсолютно жорстка;
- тіло котиться без проковзування.

Якщо допустити, що у бульби, яка котиться каскадом розгону у вигляді лотка напівциліндричної форми без контакту з його боковими поверхнями, то для вказаних умов визначальними кінематичними параметрами руху будуть: швидкість, прискорення, час переміщення. Нехай, бульби мають сферичну форму із рівномірним розподілом маси, тоді відношення радіусу інерції бульби  $\rho$  до її радіуса (сфери)  $r$  є рівним  $\rho/r = \sqrt{0,4}$ .

Так як бульба котиться лотком у режимі чистого кочення, то швидкість геометричної точки контакту  $O$  рівна нулю, тобто вона є миттєвим центром швидкостей:

$$V_0 = V_c - r\dot{\phi}. \quad (1)$$

де  $V_c$  – швидкість центра мас бульби, м/с;  $\dot{\phi}$  – кутова швидкість бульби, рад./с;  $r$  – радіус бульби, м.

Кінетична енергія бульби під час руху похилою площиною:

$$T = \frac{mV_c^2}{2} + \frac{I_c\dot{\phi}^2}{2}, \quad (2)$$

де  $I_c$  – момент інерції кулі відносно центральної горизонтальної осі, що перпендикулярна площині її руху, який рівний  $I_c = m\rho^2$ , кг·м<sup>2</sup>;  $\rho$  – радіус інерції кулі, м.

Відтак, кінетична енергія бульби сферичної форми становитиме:

$$T = m \frac{r^2 + \rho^2}{2} \dot{\phi}^2. \quad (3)$$

Відповідно, потенційна енергія бульби, яка рухається похилою площинною:

$$\Pi = -mgS \sin \alpha, \quad (4)$$

де  $S$  – шлях руху бульби (довжина лотка розгону картоплі), м.

Закон збереження енергії для такої механічної системи можна записати із урахуванням, що  $\dot{S} = V_c$  та  $\dot{\phi} = V_c / r$ , тоді після перетворень отримаємо:

$$T + \Pi = \frac{m}{2} \lambda^{-1} \dot{S}^2 - mgS \sin \alpha = c_1. \quad (5)$$

У початковий момент часу ( $t = 0$ ) постійна  $c_1 = \frac{mV_0^2}{2\lambda}$ , а  $\lambda$  –

визначається за співвідношенням  $\lambda = \frac{r^2}{r^2 + \rho^2}$ .

Таким чином, диференціальне рівняння руху бульби сферичної форми матиме вигляд:

$$\left( \frac{dS}{dt} \right)^2 = 2gS\lambda \sin \alpha + V_0^2. \quad (6)$$

Із рівняння (6) визначимо швидкість бульби:

$$\frac{d\dot{S}}{dt} = \sqrt{2gS\lambda \sin \alpha + V_0^2}. \quad (7)$$

Диференціювання рівняння (7) дозволяє отримати рівняння, яке характеризує прискорення бульби вздовж каскаду розгону:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = \frac{\sqrt{2gS\lambda \sin \alpha + V_0^2}}{dS} \frac{dS}{dt} = g\lambda \sin \alpha. \quad (8)$$

Для сповільнення руху бульби необхідно передбачити каскад із поверхнею, яка дозволить виконати умову  $V_c \rightarrow \min$ . Конструктивно можна виконати два варіанти каскаду сповільнення: каскад виконаний із двох прямолінійних частин (похилої та горизонтальної); каскад виконаний криволінійним із певним радіусом  $R$ , при цьому, один кінець закріпити шарнірно, а вільний кінець каскаду оперти на пружний шток (рис. 1).

Розглянемо рух бульби масою  $m$ , що котиться каскадом сповільнення (рис. 2, б). При  $R = \text{const.}$ , на певному відрізку пройденого шляху, матимемо  $S = R \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)$ , а ордината точки  $P$  змінюватиметься

із урахуванням значень, які визначаються за формулою  $Y_P = R \cdot \cos \theta$ .

Відповідно до закону збереження енергії, для випадку переміщення тіл сферичної форми криволінійними поверхнями, матимемо:

$$\frac{E_0}{m} = \frac{r^2 + \rho^2}{2} \theta^2 - g y_P + r g \cos \theta = \frac{r^2 + \rho^2}{2} \theta^2 + (r - R) g \cos \theta, \quad (9)$$

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{S}}{r} + \dot{\theta} = \frac{R}{r} \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) + \dot{\theta} = \frac{R - r}{r} \dot{\theta}. \quad (10)$$

У початковий момент часу ( $t = 0$ ), коли бульба торкнеться поверхні каскаду, значення константи  $E_0 = 0$ :

$$\frac{1}{2\lambda} = (R - r)^2 \theta^2 = g(R - r) \cos \theta. \quad (11)$$

Із урахування значення  $\lambda$  та зробивши відповідні перетворення у рівнянні (11), отримаємо формулу для визначення кутової швидкості переміщення бульби криволінійною поверхнею:

$$\dot{\phi} = \sqrt{\frac{2g(R - r) \cos \theta}{r^2 + \rho^2}}. \quad (12)$$

Швидкість центра мас бульби сферичної форми та проєкції її вектора на координатні осі визначаються за відомими формулами:

$$V = r\varphi, \quad V_x = V \cos \theta, \quad V_y = V \sin \theta. \quad (13)$$

Диференціюючи рівняння (12), отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &= \frac{d}{dt} \left[ \sqrt{\frac{2g(R - r)}{r^2 + \rho^2}} \cdot \sqrt{\cos \theta} \right] = \\ &= \sqrt{\frac{2g(R - r)}{r^2 + \rho^2}} \cdot \frac{\sin \theta}{2\sqrt{\cos \theta}} \frac{d\theta}{dt} = \frac{rg}{r^2 + \rho^2} \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (14)$$



Отримані залежності дозволяють визначити основні кінематичні параметри, що необхідні для проектування двокаскадного садильного апарату картоплі пасивного типу.

Розрахунок значень швидкості переміщення одиночних бульб, які були відокремлені від загальної маси у бункері, каскадами розгону та сповільнення за отриманими залежностями із урахуванням прийнятих допущень, дозволяє побудувати графічні залежності для аналізу руху бульби каскадом розгону (рис. 3) і каскадом сповільнення (рис. 4).

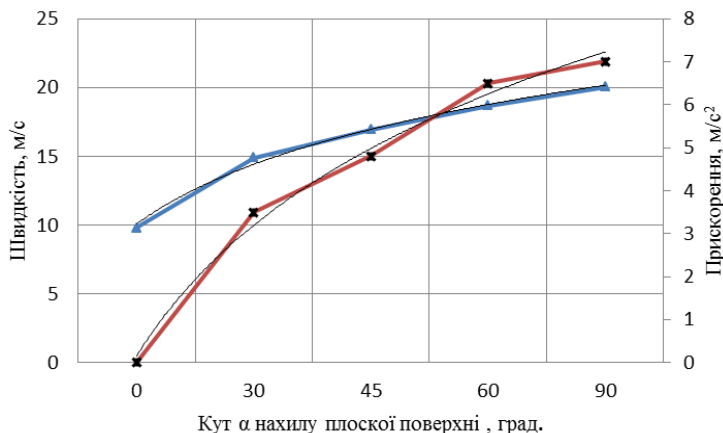


Рис. 3 – Вплив кута нахилу  $\alpha$  каскаду розгону на швидкість ( $\Delta$ ) та прискорення (x) бульби сферичної форми

Аналіз графічних залежностей показує, що, відповідно до формули (7), за наявності мінімального періоду вільного падіння бульби, збільшення кута нахилу прямолінійної ділянки каскаду розгону призводить до зростання швидкості бульби від 9,80 м/с до 20,02 м/с. За збільшення кута нахилу похилої прямолінійної ділянки прискорення інтенсивно зростає від 0 до 7 м/с<sup>2</sup>, а це є негативним явищем, оскільки може викликати пошкодження бульби. Зміна значень обох величин (прискорення, швидкості) підкоряється логарифмічному закону. Ураховуючи зазначене вище, довжина каскаду розгону має бути обмежена. Якщо цього не зробити, то при зміні напрямку руху на каскаді сповільнення бульба буде травмуватись, що є недопустимим. Вирішити цю проблему можна зменшенням довжини каскаду розгону або встановленням демпфуючого елемента на переході між двома каскадами.

У випадку переміщення бульби на каскаді сповільнення із криволінійною ділянкою, важливим є кут  $\theta$ , який характеризує положення бульби на поверхні каскаду сповільнення.

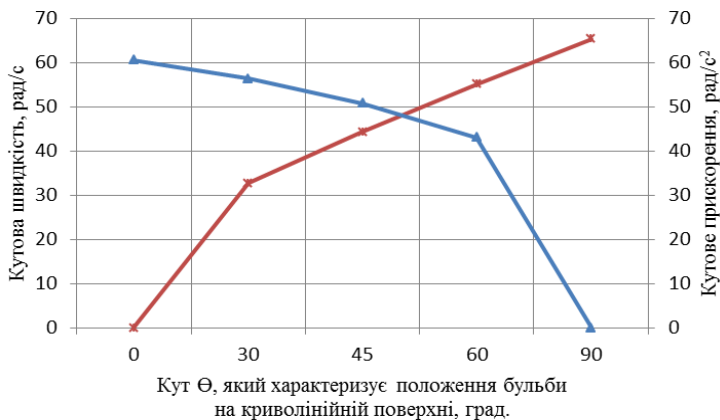


Рис. 4 – Вплив кута  $\theta$  на кутову швидкість ( $\Delta$ ) та прискорення ( $x$ ) бульби сферичної форми на каскаді сповільнення

Графіки на рис. 4 відображають характер сповільнення бульби, що має сферичну форму, при її русі криволінійною поверхнею каскаду у формі частини кола. У початковий момент часу, при переході бульби з каскаду розгону на каскад сповільнення, за кута  $\theta = 90^\circ$ , її кутова швидкість рівна –  $\dot{\varphi} = 0$ , а прискорення бульби у цей момент становить  $\ddot{\varphi} = 65,3 \text{ рад./с}^2$ .

У момент досягнення бульбою крайнього нижнього положення, за кута  $\theta = 0^\circ$ , кутова швидкість бульби матиме максимальне значення  $\dot{\varphi}_{\text{max}} = 60,5 \text{ рад/с}$ , а прискорення буде рівне нулю. Після цього, також важливо зменшити і швидкість до нульового значення. Конструктивним рішенням для каскаду сповільнення може бути його шарнірне кріплення із підпружиненням вільного кінця, що сприятиме зміні координати крайнього обрізу каскаду (тобто досягти умови, коли  $V_c \rightarrow 0$ ).

Інші конструктивні параметри гравітаційних каскадів садильного апарата у вигляді прямолінійних і криволінійних ділянок доцільно визначати за допомогою експериментальних досліджень, які дозволять

вибрати раціональну конструкцію садильного апарату картоплі пасивного типу [8].

### Висновки

У результаті теоретичних досліджень одержані залежності, які описують переміщення насіння картоплі сферичної форми поверхнями садильного апарату пасивного типу, що дозволяють провести аналіз швидкостей та прискорень бульб із урахуванням кута нахилу каскаду розгону та кута, що характеризує положення бульби на каскаді сповільнення. На основі аналізу запропоновано конструктивні рішення для створення садильного апарату картоплі пасивного типу, в якому під час переміщення бульб від бункера до поверхні поля не відбувається їх травмування.

### Список посилань

1. Проспекти фірм : ВАТ “Ковельсільмаш”, ПП Бартощук А. Г, ВАТ “Завод Львівсільмаш”, Vomet, UNIA.
2. Думич, В. Аналіз конструкцій для садіння картоплі / В. Думич // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 12(39). – С. 10–13.
3. Проспекти фірм : Cramer, Grimme, Agronomic, Miedema, NP Koning.
4. Заїка, П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Машини для сівби та садіння / П. М. Заїка. – Харків : Око, 2002. – 452 с.
5. Гусев, В. А. Огляд конструкцій сепараторів сипких матеріалів / В. А. Гусев, І. М. Дударев, М. В. Токарчук // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк, 2019. – Вип. 42. – С. 20–28. <https://doi.org/10.36910/agromash.vi42.172>
6. Дідух, В. Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів : монографія / В. Ф. Дідух. – Луцьк : ЛДТУ, 2002. – 165 с.
7. Заика, П. М. Избранные задачи земледельческой механики: практ. пособие. / П. М. Заика. – Киев : Изд-во УСХА, 1992. – 512 с.
8. Патент №133848 UA, МПК A01C3/06, A01C15/00. Машина для садіння картоплі з одночасним внесенням органічних добрив / Ляшук В. М., Поліщук М. М, Дідух В. Ф.; заявл. 12.11.2018; опубл. 25.04.2019; Бюл. № 8, 2019 р.
9. Ляшук, В. М. Особливості формування врожаю картоплі / В. М. Ляшук, В. Ф. Дідух, Т. П. Герасимик-Чернова, І. С. Бартошик // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк, 2019. – Вип. 42. – С. 49–55. <https://doi.org/10.36910/agromash.vi42.175>

## IMPACT OF FRUIT AND VEGETABLE SLICING ON THE AREA OF PIECES' SURFACE

I. Dudarev, S. Panasyuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



**Key words:**

chips,  
thickness of fruit and  
vegetable slicing,  
area of pieces' surface,  
fruit model,  
vegetable model

**Article history:**

Received 10.03.2020

Accepted 15.05.2020

**Corresponding author:**

i\_dudarev@ukr.net

### ABSTRACT

*Vegetable and fruit chips belong to the healthy food, which is growing in popularity every year among consumers. Such popularity of chips is caused by the fact that the product is made from natural raw materials and contains vitamins and useful substances for the human body. The technological line of chips production can be located in the vegetable and fruit farms. The technology of chips production from vegetable and fruit raw materials involves the operations of fruits and vegetable slicing and drying processes. The time and energy consumption of the drying process depend on the area of pieces' surface and thickness of pieces. The intensity of drying process increases with increasing the area of pieces' surface. Research of impact of fruit and vegetable slicing of various shapes on the area of pieces' surface are presented in the article. The geometric models of fruit and vegetable are proposed for the calculation of the area of pieces' surface. Models of fruit and vegetable have the shape of a sphere, cylinder, cone and ellipsoid. The theoretical equations were obtained for calculation of the area of pieces' surface. The equations are depended on the shape of the fruit or vegetable model and the method of slicing. It was justified that the area of pieces' surface increases with decreasing of pieces' thickness. Experimental studies of apple and pear have shown the same results as theoretical ones.*

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.294>

УДК 664.8.047

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОВЩИНИ НАРІЗУВАННЯ ПЛОДІВ ТА КОРЕНЕПЛОДІВ НА ПЛОЩУ ПОВЕРХНІ ШМАТОЧКІВ

І.М. Дударев, С.Г. Панасюк

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*Чипси з овочево-фруктової сировини належать до продуктів здорового харчування, популярність яких серед споживачів різного віку зростає щороку. Технологія виготовлення чипсів з овочево-фруктової сировини передбачає операції нарізування плодів і коренеплодів та сушіння їх шматочків. Тривалість сушіння та витрати енергії на процес залежать від площі поверхні шматочків і їх товщини. Що більша площа поверхні шматочків та менша їх товщина, то інтенсивніше відбувається сушіння сировини. У статті викладені результати дослідження впливу товщини нарізування плодів та коренеплодів різної форми на площу поверхні шматочків. Для розрахунку площі поверхні шматочків сировини запропоновані моделі плодів та коренеплодів у формі геометричних тіл: сфера, циліндр, зрізаний конус, сплюснений еліпсоїд обертання, витягнутий еліпсоїд обертання. У результаті моделювання одержані теоретичні залежності для розрахунку площі поверхні шматочків залежно від форми моделі плода чи коренеплоду і способу їх нарізування. За результатами розрахунків встановлено, що зі зменшенням товщини нарізування відбувається збільшення площі поверхні шматочків. Порівняння результатів теоретичного розрахунку площі поверхні шматочків, що отримані у результаті нарізування моделей яблука та груші, з результатами експериментального визначення площі поверхні шматочків вказує на адекватність запропонованих розрахункових моделей.*

**Ключові слова:** чипси, товщина нарізування плодів та коренеплодів, площа поверхні шматочків, модель плода, модель коренеплоду.

### Стан питання та постановка проблеми

Перспективним напрямом переробки продукції овочівництва та садівництва є виробництво широкого асортименту чипсів (фріпсів). Виробництво овочево-фруктових чипсів щороку зростає, оскільки вони користуються попитом у споживачів [1]. Така популярність чипсів зумовлена тим, що цей продукт виготовляється із натуральної сировини, як правило місцевої, та містить вітаміни і корисні речовини

для організму людини [2 – 5]. Технологія виготовлення овочево-фруктових чипсів доволі проста, а технологічна лінія є компактною, тому може бути розташована безпосередньо у господарствах, які займаються вирощуванням овочів і фруктів. Використання місцевої сировинної бази для виробництва чипсів дозволяє зменшити втрати урожаю та підвищити рентабельність вирощування овочів і фруктів.

Найбільш енергоємною операцією в технології виготовлення чипсів є сушіння овочево-фруктової сировини. Для сушіння сировини використовують конвективний, сублімаційний, інфрачервоний або вакуумний методи [6 – 8]. Режим сушіння залежить від виду сировини, її властивостей та товщини нарізаних із неї шматочків. Форма шматочків сировини і, відповідно, форма готового продукту залежить від форми плода чи коренеплоду, а також способу нарізування. Важливим параметром для процесу сушіння сировини є площа поверхні шматочків сировини, яка залежить від розмірів плода та коренеплоду. Крім того, площа поверхні шматочків, що отримують із одного плода чи коренеплоду, залежить від товщини нарізування шматочків. Визначення площі поверхні шматочків сировини експериментальним шляхом потребує великої кількості вимірювань та складних розрахунків, тому для цього доцільно використовувати моделі плодів та коренеплодів, що дозволяють отримати математичні залежності для розрахунку цього параметра із урахуванням форми та розмірів сировини, а також способу її нарізування.

Для математичного опису форми плодів та коренеплодів використовуються різні функції, що дозволяють визначити об'єм та площу поверхні моделі [9, 10]. Ці моделі є складними для обчислення площі поверхні шматочків, що отримані внаслідок нарізування плодів та коренеплодів. Для таких розрахунків більш придатними є моделі плодів та коренеплодів, які одержані шляхом поєднання таких геометричних тіл, як сфера, циліндр, зрізаний конус та еліпсоїд обертання. Разом із тим, це питання є малодослідженим, тому подальші дослідження у цьому напрямі є актуальними.

**Мета дослідження** – дослідження впливу товщини нарізування плодів та коренеплодів на площу поверхні шматочків шляхом моделювання їх форми.

### **Матеріали і методи**

Теоретичні дослідження базувалися на геометричному та математичному моделювання плодів і коренеплодів із використанням основних положень нарисної геометрії та вищої математики. Теоретичні розрахунки та статистичну обробку експериментальних

даних проводили за допомогою прикладної комп'ютерної програми MathCAD 14.

Перевірку адекватності моделей плодів та коренеплодів проводили шляхом порівняння результатів теоретичних розрахунків за отриманими залежностями та експериментальними даними, які отримані після математичної обробки результатів вимірювання геометричних параметрів таких плодів, як груша та яблуко.

Методика вимірювання геометричних параметрів плода передбачала розрізування плода вздовж навіп, визначення контуру половини плода, на якому позначалася вісь симетрії. Вздовж осі симетрії контуру половини плода спрямовувалася вісь  $x$ , перпендикулярно якій спрямовувалася вісь  $y$  (рис. 1). На контурі проводили з кроком  $\delta$  (товщина нарізування) лінії, що паралельні осі  $y$ , та визначали ординату  $y_n$  точок перетину ліній з контуром плода. Приймали, що контур плода симетричний, тому ординати точок перетину визначали лише з одного боку відносно осі  $x$  (із додатним  $y$ ).

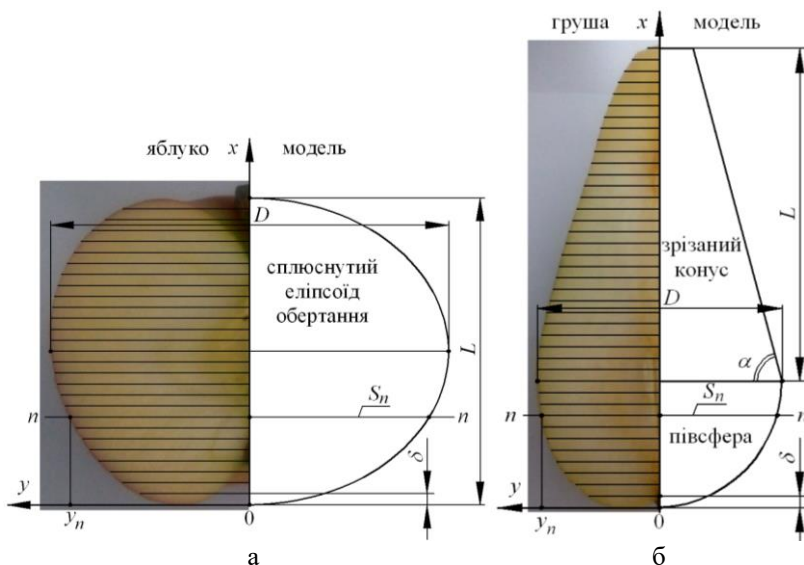


Рис. 1 – Плід та його розрахункова модель:  
а – яблуко; б – груша

За визначеними значеннями  $y_n$  розраховували площі відповідних перерізів (за поперечного нарізування плодів форма усіх поперечних перерізів кругла, тому  $y_n$  – радіуси відповідних перерізів):

$$S_n = \pi y_n^2, \quad (1)$$

де  $S_n$  – площа поперечного перерізу плода  $n$ - $n$ , м<sup>2</sup>;  $y_n$  – ордината точки перетину контуру плода з лінією, що паралельна осі  $y$ , м.

Площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків плода, які отримані в результаті його поперечного нарізування:

$$S_{\text{заг.}} = \sum_{n=1}^k 2S_n, \quad (2)$$

де  $S_{\text{заг.}}$  – площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків плода, м<sup>2</sup>;  $k$  – кількість перерізів плода, шт.

Методика дослідження передбачала порівнювання значення площі поверхні шматочків плода, що одержане експериментально, із значенням площі поверхні шматочків, що отримане в результаті теоретичних розрахунків на моделі плода. Модель плода вибирали із урахуванням його форми і геометричних розмірів: висоти  $L$ , діаметра  $D$  та кути нахилу твірної конусної частини  $\alpha$ .

### Результати дослідження та обговорення

Одним із факторів, який визначає тривалість конвективного сушіння рослинних матеріалів (овочів та фруктів), є площа випаровування вологи, тобто площа контакту поверхні матеріалу із нагрітим повітрям. Щоб більша площа поверхні рослинного матеріалу (площа випаровування), то менша тривалість сушіння матеріалу і, відповідно, менші витрати енергії на процес. Таким чином, у технології виробництва чипсів з овочево-фруктової сировини на етапі підготовки сировини (яблук, груш, кабачків, моркви, буряків тощо), необхідно намагатися, щоб площа поверхні шматочків сировини, які одержують під час нарізування плодів чи коренеплодів, була якомога більшою. Змінити площу поверхні шматочків сировини можна шляхом зміни товщини нарізування плодів та коренеплодів. Від товщини нарізування шматочків сировини залежить не тільки їх площа поверхні випаровування вологи під час сушіння, але й якісні і кількісні показники готового продукту (чипсів). Рекомендована товщина нарізування овочево-фруктової сировини для виготовлення чипсів становить 1...3 мм.

Проаналізуємо форми плодів і коренеплодів різної овочево-фруктової сировини та визначимо вплив товщини шматочків нарізаної сировини на площу їх поверхні випаровування вологи. Зауважимо, що для виробництва чипсів із фруктів та деяких видів овочевої сировини шкірка з плодів не знімається. Інтенсивність випаровування вологи з поверхні шматочків сировини, які вкриті шкіркою, значно нижча, ніж із поверхні, на якій шкірка відсутня. Таким чином, під час визначення



площі поверхні випаровування вологи зі шматочків сировини будемо враховувати лише площу шматочків, яка немає шкірки. Це також доцільно з огляду на те, що нарізані шматочки є плоскими і, відповідно, їх товщина  $\delta$  (розмір поверхні шматочка, що покрита шкіркою) значно менша за їх довжину, ширину або діаметр.

Оскільки форма плодів і коренеплодів овочево-фруктової сировини різноманітна, а також вони відрізняються за розмірами, відповідно, форма та розміри нарізаних шматочків із них теж різноманітні. Тому для спрощення розрахунку площі поверхні шматочків сировини будемо моделювати плоди та коренеплоди за допомогою геометричних тіл: сфера, циліндр, зрізаний конус (конус), сплюснутий еліпсоїд обертання, витягнутий еліпсоїд обертання (рис. 2).

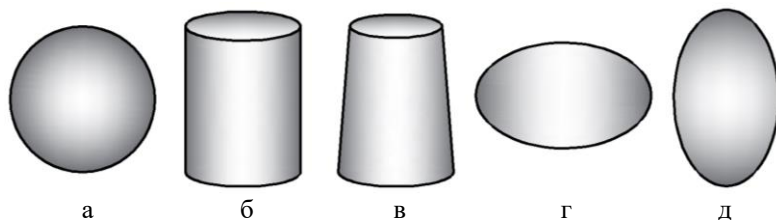


Рис. 2 – Розрахункові моделі плодів та коренеплодів:

а – сфера; б – циліндр; в – зрізаний конус; г – сплюснутий еліпсоїд обертання; д – витягнутий еліпсоїд обертання

Моделі плодів і коренеплодів будемо нарізувати на шматочки двома способами: поперек та вздовж. Для зручності розрахунків під час моделювання розміри моделі приймаються такими, щоб отримати парну кількість шматочків при її нарізуванні як поперек, так і вздовж. Також зауважимо, що площа поверхонь моделей плодів чи коренеплодів (геометричних тіл) не враховується під час розрахунку, оскільки вважаємо, що ці поверхні моделей покриті шкіркою.

Розглянемо форми плодів і коренеплодів овочево-фруктової сировини, що використовується для виробництва чипсів, зокрема, яблук, груш, моркви, буряків і кабачків. Залежно від сорту плоди яблук мають округлу, циліндричну, конічну, плоску і овальну форми (рис. 3). Округла форма плода яблука моделюється сферою, циліндрична – циліндром, конічна – зрізаним конусом, а плоска та овальна – відповідно, сплюснутим еліпсоїдом обертання та витягнутим еліпсоїдом обертання. Необхідно зауважити, що плоди яблук деяких форм, зокрема конічної, можна замінити розрахунковою моделлю, що містить зрізаний конус, який поєднаний із півсферою.

Плоди груші мають округлу, плоску, конічну, овальну та видовжену грушоподібну форми (рис. 4). Відповідно, округла форма плода груші моделюється сферою, плоска та овальна – відповідно, сплюснутим еліпсоїдом обертання та витягнутим еліпсоїдом обертання, конічна та видовжена грушоподібна – поєднанням зрізаного конуса і півсфери.

Коренеплоди (морква, буряки) мають округлу, циліндричну, конічну, овальну та плоску форми (рис. 5). Коренеплоди різних форм можна замінити розрахунковими моделями: округлу – сферою, циліндричну – циліндром, конічну – конусом або зрізаним конусом, овальну – витягнутим еліпсоїдом обертання, плоску – сплюснутим еліпсоїдом обертання.

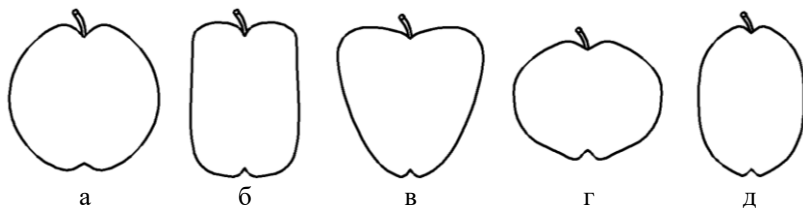


Рис. 3 – Форми плодів яблук:

а – округла; б – циліндрична; в – конічна; г – плоска; д – овальна

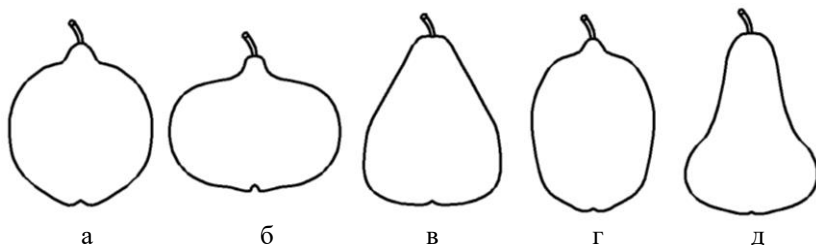


Рис. 4 – Форми плодів груш:

а – округла; б – плоска; в – конічна; г – овальна; д – видовжена грушоподібна

Залежно від сорту кабачки мають видовжено-циліндричну, овальну, булавоподібну, циліндричну та круглу форми (рис. 6). Відповідно до форми кабачків, їх можна замінити розрахунковими моделями: видовжено-циліндричну – циліндром, що поєднаний із зрізаним конусом, або зрізаним конусом, що поєднаний із півсферою, овальну – зрізаним конусом, що поєднаний із витягнутим еліпсоїдом

обертання, булавоподібну – циліндром, що поєднаний із сферою, циліндричну – циліндром, круглу – сферою або сплюснутим еліпсоїдом обертання.

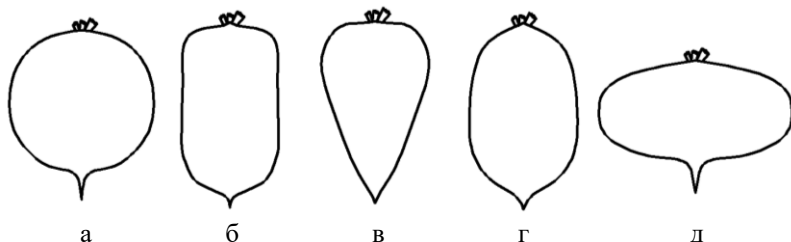


Рис. 5 – Форми коренеплідів:

а – округла; б – циліндрична; в – конічна; г – овальна; д – плоска

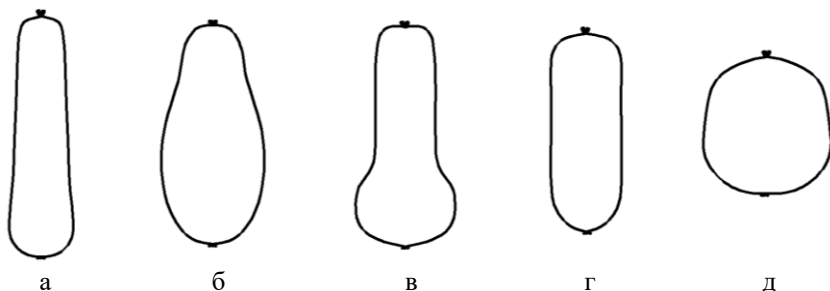


Рис. 6 – Форми кабачків:

а – видовжено-циліндрична; б – овальна; в – булавоподібна;  
г – циліндрична; д – кругла

Кількість шматочків при нарізуванні плода чи коренеплоду залежить від форми та розмірів плода чи коренеплоду, способу їх нарізування (поперек чи вздовж) та товщини нарізування:

$$N = D / \delta \text{ або } N = L / \delta, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість шматочків, шт.;  $D, L$  – відповідно, ширина (діаметр) та довжина (висота) моделі, м;  $\delta$  – товщина нарізування шматочків, м.

Якщо модель плода чи коренеплоду у формі сфери нарізувати на шматочки товщиною  $\delta$ , то, незалежно від способу нарізування (поперек чи вздовж плода або коренеплоду), отримаємо однакову кількість шматочків круглої форми різного діаметра. Перетнемо модель у формі сфери паралельними горизонтальними січними площинами, тобто поперек, відстань між якими рівна  $\delta$  (рис. 7).

Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі площиною, яка проходить через центр сфери, позначимо через 0-0, а решту отриманих перерізів, вгору та вниз від перерізу 0-0, позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа та форма однакові. Кількість отриманих перерізів при перетині січними площинами моделі з кожної сторони від перерізу 0-0, окрім перерізу 0-0, становитиме:

$$k = \frac{N}{2} - 1, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість перерізів 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$  з кожної сторони від перерізу 0-0, шт.;  $N$  – кількість шматочків, причому  $N = D/\delta$ , шт.

Площа перерізу 0-0 розраховується за формулою:

$$S_0 = \pi D^2 / 4, \quad (5)$$

де  $S_0$  – площа перерізу 0-0 моделі,  $m^2$ ;  $D$  – діаметр моделі плода чи коренеплоду у формі сфери, м.

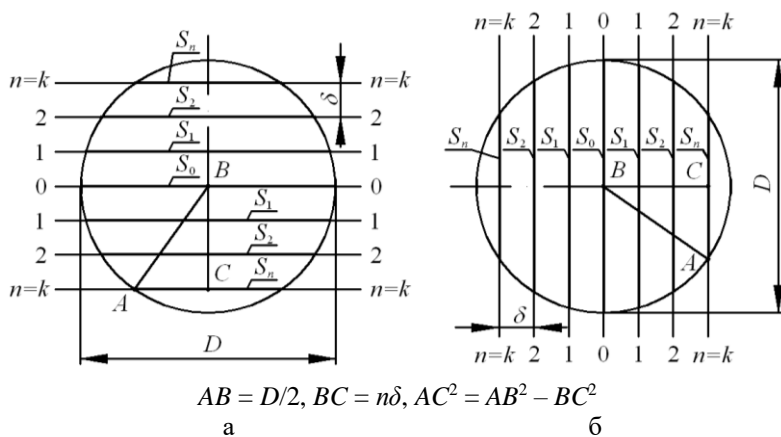


Рис. 7 – Розрахункові моделі плода чи коренеплоду у формі сфери:  
а – поперечне нарізування; б – поздовжнє нарізування

Площа решти перерізів моделі у формі сфери:

$$S_n = \pi \left( \frac{D^2}{4} - (n\delta)^2 \right), \quad (6)$$

де  $S_n$  – площа перерізу моделі  $n$ - $n$ ,  $m^2$ ;  $n$  – номер перерізу, для якого розраховується площа, відлік перерізів здійснюють від перерізу 0-0, окрім самого перерізу 0-0 ( $n = 1, 2, \dots, k$ ), шт.

Площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків, які отримані в результаті поперечного нарізування моделі у формі сфери:

$$S_{заг.} = 2S_0 + \sum_{n=1}^k 4S_n . \quad (7)$$

У формулі (7) маємо дві площі  $S_0$ , а кожної площі  $S_n$  – чотири. Це пояснюється тим, що при розрізуванні плода чи коренеплоду на дві частини отримуємо у місці розрізування дві поверхні з однаковою площею, які належать двом утвореним шматочкам.

У випадку поздовжнього нарізування моделі плода чи коренеплоду у формі сфери, модель перетинається паралельними вертикальними січними площинами, тобто вздовж, відстань між якими рівна  $\delta$ . Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі площиною, яка проходить через центр сфери, позначимо через 0-0, а решту перерізів, зліва та справа від перерізу 0-0, позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа та форма однакові. Розрахунок площі поверхні (без шкірки) усіх шматочків для цього випадку здійснюється за формулами (3) – (7).

Якщо плід чи коренеплід мають форму, яку можна замінити моделлю циліндра, тоді при поперечному нарізуванні такої моделі на шматочки товщиною  $\delta$ , отримаємо однакові шматочки круглої форми з діаметром  $D$ . Перетнемо модель паралельними горизонтальними січними площинами, відстань між якими рівна  $\delta$  (рис. 8, а). Перерізи, що отримані внаслідок перетину моделі площинами, позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ . Тоді залежності для розрахунку площі перерізів та площі поверхні (без шкірки) усіх шматочків матимуть вигляд:

$$S_n = \pi D^2 / 4 , \quad (8)$$

$$k = N - 1 , \quad (9)$$

$$S_{заг.} = \sum_{n=1}^k 2S_n . \quad (10)$$

де  $N$  – кількість шматочків, причому  $N = L/\delta$ , шт.

У випадку поздовжнього нарізування моделі у формі циліндра, перетнемо її паралельними вертикальними січними площинами, тобто вздовж, відстань між якими рівна  $\delta$  (рис. 8, б). Усі перерізи моделі матимуть прямокутну форму. Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі площиною, яка проходить через вісь циліндра, позначимо через 0-0, а решту перерізів позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа однакова.

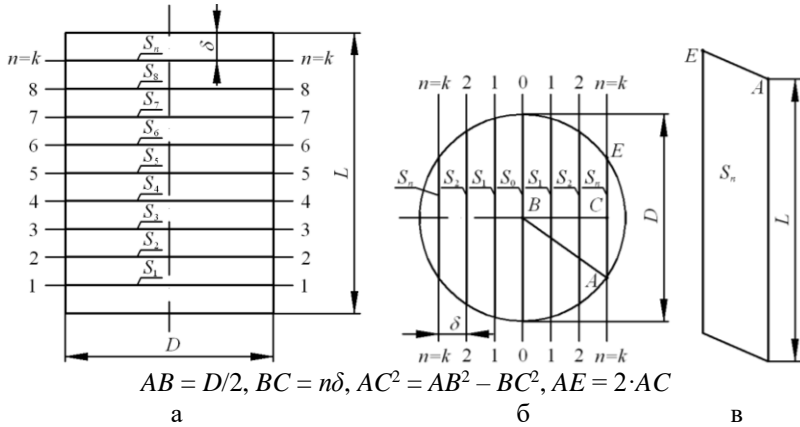


Рис. 8 – Розрахункові моделі плода чи коренеплоду у формі циліндра:  
 а – поперечне нарізування; б – поздовжнє нарізування (вид зверху);  
 в – поздовжній переріз циліндра  $k-k$

Площа перерізу 0-0 моделі у формі циліндра:

$$S_0 = DL, \quad (11)$$

де  $L$  – довжина моделі плода чи коренеплоду у формі циліндра, м.

Площа решти перерізів моделі у формі циліндра для цього випадку:

$$S_n = 2L \sqrt{\frac{D^2}{4} - (n\delta)^2}. \quad (12)$$

Площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків, які отримані в результаті поздовжнього нарізування моделі у формі циліндра розраховується за формулою (7). У формулі (7) кількість перерізів  $k$  розраховується за виразом (4), де кількість шматочків рівна  $N = D/\delta$ .

Якщо плід чи коренеплід мають форму, яку можна замінити моделлю у формі зрізаного конуса, тоді при поперечному нарізуванні такої моделі на шматочки товщиною  $\delta$ , отримаємо шматочки круглої форми із різним діаметром. Перетнемо модель у формі зрізаного конуса паралельними горизонтальними січними площинами, крок між якими рівний  $\delta$  (рис. 9, а). Перерізи, що отримані внаслідок перетину моделі площинами, позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n-n$ , тоді їх площа:

$$S_n = \frac{\pi}{4} \left( D - \frac{2n\delta}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2, \quad (13)$$

де  $D$  – діаметр більшої основи моделі у формі зрізаного конуса, м;  $\alpha$  – кут нахилу твірної моделі у формі зрізаного конуса, град.

Площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків, які отримані в результаті поперечного нарізування моделі у формі зрізаного конуса, розраховується за формулою (10). У формулі (10) кількість перерізів  $k$  розраховується за виразом (9), де кількість шматочків рівна  $N = L/\delta$  (де  $L$  – довжина моделі у формі зрізаного конуса, м).

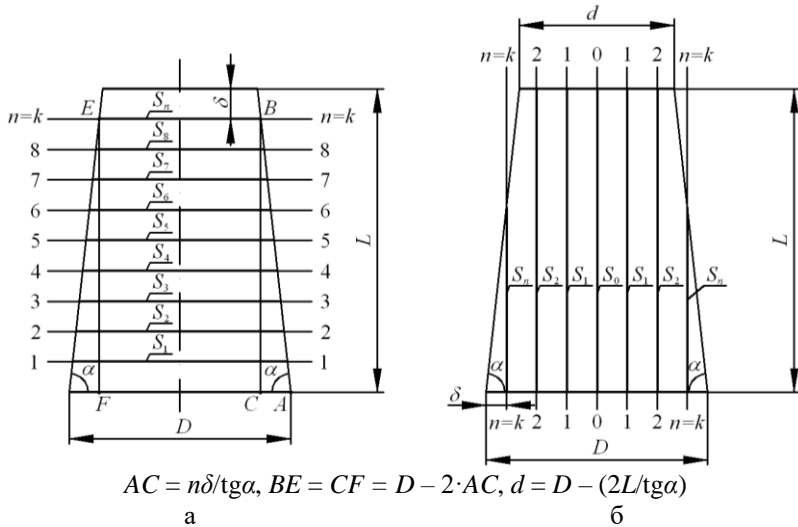


Рис. 9 – Розрахункові моделі плода чи коренеплоду у формі зрізаного конуса:

а – поперечне нарізування; б – поздовжнє нарізування

У випадку поздовжнього нарізування моделі у формі зрізаного конуса, вона перетинається паралельними вертикальними січними площинами, відстань між якими рівна  $\delta$  (рис. 9, б). Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі січною площиною, яка проходить через вісь зрізаного конуса, позначимо через 0-0, а решту перерізів позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа та форма однакові. Осьовий переріз 0-0 зрізаного конуса матиме форму рівнобедреної трапеції (рис. 10). Лінії перетинів решти січних площин із моделлю у формі зрізаного конуса є частинами гіпербол, що зумовлюють форму перерізів (рис. 11). Площа перерізу 0-0:

$$S_0 = L \left( D - \frac{L}{\operatorname{tg}\alpha} \right). \quad (14)$$

Площа перерізів моделі, які мають довжину  $L$ :

$$S_n^* = \int_{\frac{D \operatorname{tg} \alpha}{2} - L}^{\frac{D \operatorname{tg} \alpha}{2}} 2 \sqrt{\frac{x^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} - (n\delta)^2} dx. \quad (15)$$

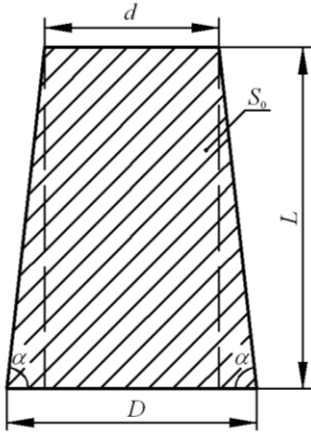


Рис. 10 – Поздовжній переріз 0-0 моделі у формі зрізаного конуса

Для того, щоб визначити кількість перерізів, для яких площа розраховується за формулою (15), необхідно обчислити діаметр  $d$  меншої основи зрізаного конуса та кількість шматочків, що отримують при нарізування моделі діаметром  $d$ :

$$d = D - \frac{2L}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (16)$$

$$N^* = d/\delta, \quad (17)$$

де  $d$  – діаметр меншої основи зрізаного конуса, м;  $N^*$  – кількість шматочків, що отримують при нарізування моделі діаметром  $d$ , (значення  $N^*$  заокруглюють до цілого в меншу сторону), шт.

За відомим значення  $N^*$  визначають кількість перерізів  $k^*$  з однієї сторони від перерізу 0-0, для яких площа розраховується за формулою (15). Загальна кількість перерізів  $k$  розраховується за виразом (4), в якому кількість шматочків рівна  $N = D/\delta$ .

Площа перерізів моделі, які мають довжину меншу за  $L$ , розраховується за формулою:

$$S_n^{**} = \int_{n\delta \operatorname{tg} \alpha}^{\frac{D \operatorname{tg} \alpha}{2}} 2 \sqrt{\frac{x^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} - (n\delta)^2} dx. \quad (18)$$

Площа поверхні (без шкірки) усіх шматочків, які отримані в результаті поздовжнього нарізування моделі плода чи коренеплоду у формі зрізаного конуса, розраховується за формулою:

$$S_{\text{заг.}} = 2S_0 + \sum_{n=1}^{k^*} 4S_n^* + \sum_{n=k^*+1}^k 4S_n^{**}. \quad (19)$$

Якщо плід чи коренеплід мають форму, яку можна замінити моделлю у формі сплюсненого еліпсоїда обертання, тоді при



поперечному нарізуванні такої моделі отримаємо шматочки круглої форми із різним діаметром. Перетнемо цю модель паралельними горизонтальними січними площинами, відстань між якими рівна  $\delta$  (рис. 12). Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі площиною, яка проходить через перетин осей еліпсоїда, позначимо через 0-0, а решту перерізів позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа та форма однакові. Кількість перерізів із кожної сторони від перерізу 0-0 розраховується за формулою (4), в якій кількість шматочків рівна  $N = L/\delta$  (де  $L$  – довжина моделі, м). Площа перерізу 0-0 для цієї моделі розраховується за формулою (5).

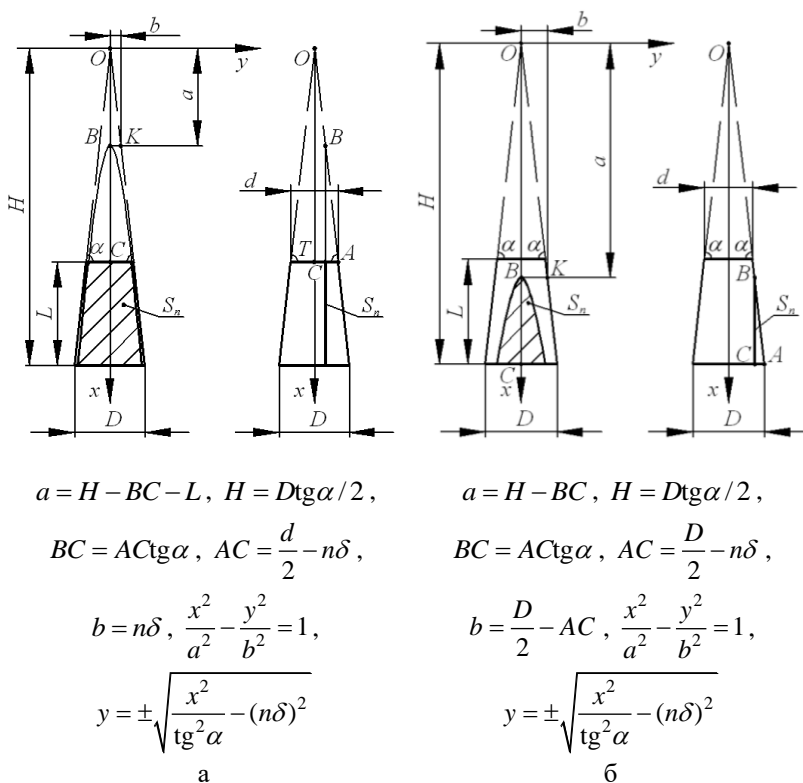


Рис. 11 – Схеми до розрахунку площ перерізів моделі у формі зрізаного конуса, що розрізана вздовж:

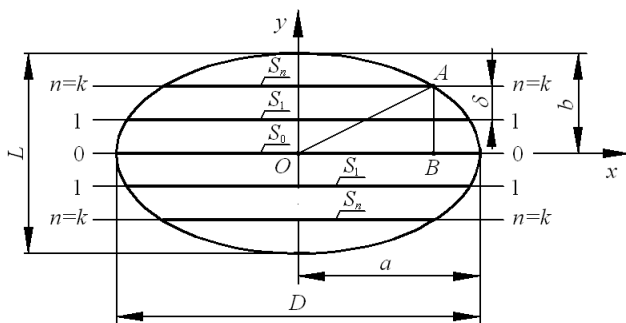
а – довжина перерізу рівна  $L$ ; б – довжина перерізу менша за  $L$

Площа решти перерізів моделі розраховується за формулою:

$$S_n = \frac{\pi D^2}{4} \left( 1 - \frac{4(n\delta)^2}{L^2} \right), \quad (20)$$

де  $D, L$  – відповідно, ширина (діаметр) та довжина моделі, м.

Площа поверхні (без шкірки) шматочків, що отримані внаслідок поперечного нарізування моделі плода чи коренеплоду у формі сплюсненого еліпсоїда обертання, розраховується за виразом (7).



$$\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} = 1, \quad a = \frac{D}{2}, \quad b = \frac{L}{2}, \quad BO = x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}, \quad y = AB = n\delta, \quad S_n = \pi x^2$$

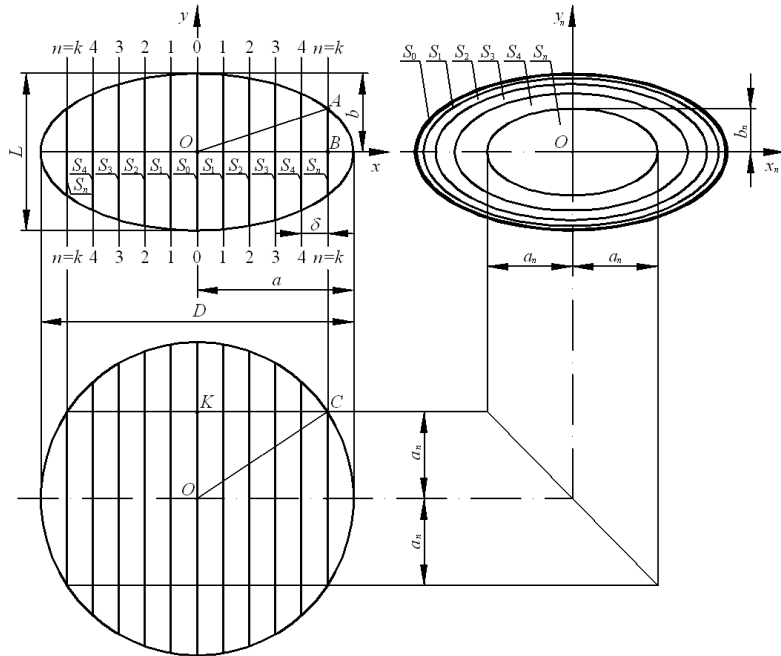
Рис. 12 – Розрахункова модель плода чи коренеплоду у формі сплюсненого еліпсоїда обертання за поперечного нарізування

Для випадку поздовжнього нарізування моделі у формі сплюсненого еліпсоїда обертання, перетнемо модель паралельними вертикальними січними площинами з кроком  $\delta$  (рис. 13). Переріз, що отриманий внаслідок перетину моделі площиною, яка проходить через перетин осей еліпсоїда, позначимо через 0-0, а решту перерізів позначимо через 1-1, 2-2, ...,  $n$ - $n$ , причому симетричні перерізи відносно перерізу 0-0 позначимо однаково, оскільки їх площа та форма однакові. Кількість перерізів із кожної сторони від перерізу 0-0 розраховується за формулою (4), в якій кількість шматочків –  $N = D/\delta$ . Площа перерізу 0-0 для цієї моделі розраховується за формулою:

$$S_0 = \pi DL/4. \quad (21)$$

Площа решти перерізів моделі розраховується за формулою:

$$S_n = \frac{\pi L}{2} \sqrt{\left( \frac{D^2}{4} - (n\delta)^2 \right) \left( 1 - \frac{4(n\delta)^2}{D^2} \right)}. \quad (22)$$



$$\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} = 1, \quad y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \quad x = BO = n\delta, \quad a = \frac{D}{2}, \quad b = \frac{L}{2},$$

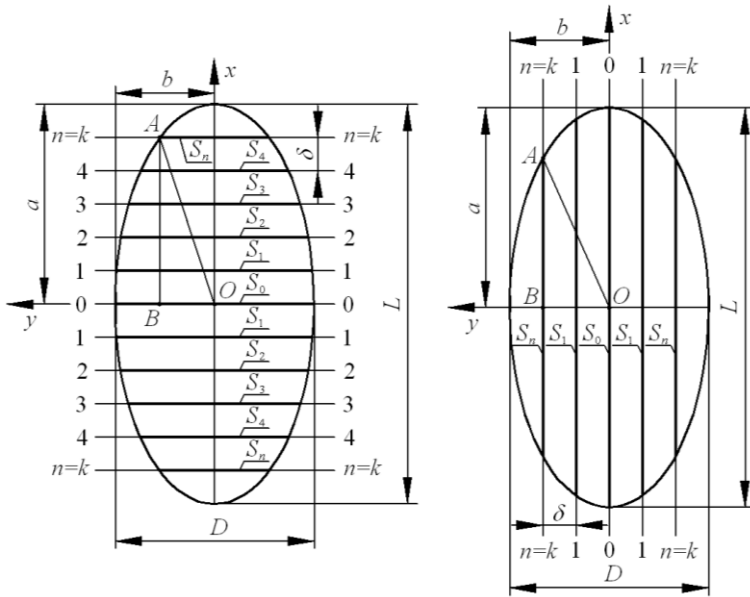
$$a_n = KO = \sqrt{CO^2 - CK^2}, \quad CO = \frac{D}{2}, \quad CK = n\delta, \quad b_n = AB = y,$$

$$S_0 = \pi ab, \quad S_n = \pi a_n b_n$$

Рис. 13 – Розрахункова модель плода чи коренеплоду у формі сплюсненого еліпсоїда обертання за поздовжнього нарізування

Площа поверхні (без шкірки) шматочків, що отримані внаслідок поздовжнього нарізування моделі плода чи коренеплоду у формі сплюсненого еліпсоїда обертання, розраховується за виразом (7).

Розрахунок площі поверхні (без шкірки) шматочків, що отримані внаслідок поперечного або поздовжнього нарізування моделі плода чи коренеплоду у формі витягнутого еліпсоїда обертання (рис. 14), відбувається аналогічно до розрахунку площі поверхні шматочків, отриманих внаслідок, відповідно, поперечного або поздовжнього нарізування моделі у формі сплюсненого еліпсоїда обертання.



$$\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} = 1, \quad y = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}},$$

$$x = AB = n\delta, \quad a = \frac{L}{2}, \quad b = \frac{D}{2},$$

$$S_n = \pi y^2$$

а

$$a_n = AB = x = a\sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}, \quad a = \frac{L}{2},$$

$$b = \frac{D}{2}, \quad y = BO = n\delta,$$

$$b_n = \sqrt{\frac{D^2}{4} - (n\delta)^2}, \quad S_n = \pi a_n b_n$$

б

Рис. 14 – Розрахункові моделі плода чи коренеплоду у формі витягнутого еліпсоїда обертання:  
а – поперечне нарізування; б – поздовжнє нарізування

Моделі деяких плодів та коренеплодів утворені шляхом комбінації різних геометричних тіл або їх частин. Наприклад, плід груші конічної чи видовженої грушоподібної форми моделюється поєднанням зрізаного конуса і півсфери. У такому випадку кожен частину моделі (наприклад, зрізаний конус та півсферу) розраховують окремо, відповідно до способу нарізування за методикою, яка викладена вище. Окремі перерізи моделі складатимуться із двох або більшої кількості частин, залежно від способу нарізування моделі. Наприклад, переріз

може містити частину, що отримана внаслідок перетину січною площиною зрізаного конуса моделі, та частину, що отримана внаслідок перетину тією ж площиною півсфери моделі. Після розрахунку площі частин одного перерізу додають.

Результати розрахунку площі поверхні (без шкірки) шматочків, що одержані в результаті нарізування в різний спосіб моделей плодів та коренеплодів різної форми, представлені в таблиці.

Таблиця – Вплив товщини нарізування моделей плодів і коренеплодів різної форми на площу поверхні шматочків (без шкірки)

Модель плода чи коренеплоду	Параметри моделі	Товщина $\delta$ , м	Площа $S_{заг.}$ , м <sup>2</sup>	Спосіб нарізування
Сфера	$D = 0,084$ м	0,001	0,621	поперек і вздовж
		0,002	0,310	
		0,003	0,207	
Циліндр	$D = 0,084$ м, $L = 0,108$ м	0,001	1,186	поперек
		0,002	0,587	
		0,003	0,388	
		0,001	1,195	вздовж
		0,002	0,596	
		0,003	0,396	
Зрізаний конус	$D = 0,072$ м, $L = 0,120$ м, $\alpha = 76$ град.	0,001	0,386	поперек
		0,002	0,191	
		0,003	0,126	
		0,001	0,390	вздовж
		0,002	0,191	
		0,003	0,127	
Сплюснутий еліпсоїд обертання	$D = 0,084$ м, $L = 0,060$ м	0,001	0,443	поперек
		0,002	0,221	
		0,003	0,147	
		0,001	0,443	вздовж
		0,002	0,222	
		0,003	0,148	
Витягнутий еліпсоїд обертання	$D = 0,060$ м, $L = 0,180$ м	0,001	0,679	поперек
		0,002	0,339	
		0,003	0,226	
		0,001	0,678	вздовж
		0,002	0,339	
		0,003	0,226	

Аналіз одержаних даних свідчить про те, що зі зменшенням товщини  $\delta$  нарізування відбувається збільшення загальної площі поверхні (без шкірки) шматочків  $S_{заг.}$ . Причому зі зменшенням товщини  $\delta$  шматочків з 3 мм до 2 мм, площа  $S_{заг.}$  зростає в 1,5 рази, із зменшенням товщини  $\delta$  з 2 мм до 1 мм – площа  $S_{заг.}$  зростає в 2 рази та із зменшенням товщини  $\delta$  шматочків з 3 мм до 1 мм – площа  $S_{заг.}$  зростає в 3 рази. Таким чином, для прискорення процесу сушіння овочево-фруктової сировини, а також для зменшення витрат енергії на процес, її необхідно нарізувати на шматочки якомога меншої товщини (із урахуванням вимог до готового продукту).

Порівняння площі поверхні (без шкірки) шматочків яблука та груші, що одержані експериментальним шляхом, із площею поверхні шматочків, яка розрахована в результаті моделювання, вказує на те, що за поперечного нарізування сировини товщиною  $\delta = 0,003$  м відхилення теоретичних значень від експериментальних не перевищує 2,8%. Оскільки для яблука за параметрів плода і моделі у формі сплюсненого еліпсоїда обертання  $D = 0,091$  м,  $L = 0,084$  м: експериментальне значення площі –  $S_{заг.} = 0,250$  м<sup>2</sup>, теоретичне значення –  $S_{заг.} = 0,243$  м<sup>2</sup>. Для груші за параметрів плода і моделі у формі, що є комбінацією зрізаного конуса із півсферою,  $D = 0,066$  м,  $L = 0,09$  м,  $\alpha = 78$  град.: експериментальне значення площі поверхні шматочків –  $S_{заг.} = 0,153$  м<sup>2</sup>, теоретичне значення –  $S_{заг.} = 0,155$  м<sup>2</sup>.

### Висновки

Тривалість процесу сушіння овочево-фруктової сировини під час виробництва чипсів залежить від товщини нарізування шматочків та площі їх поверхні, тобто площі випаровування вологи. Що менша їх товщина і більша площа поверхні, то менша тривалість сушіння і менші витрати енергії. Визначення експериментальним шляхом площі поверхні шматочків є трудомістким, тому запропоновано замінювати плоди та коренеплоди моделями, які дозволяють спростити розрахунок площі. За результатами теоретичних розрахунків, які проведені на моделях плодів і коренеплодів, встановлено, що зі зменшенням товщини нарізування відбувається збільшення загальної площі поверхні шматочків: у випадку зменшення товщини з 3 мм до 2 мм – площа зростає в 1,5 рази; у випадку зменшення товщини з 2 мм до 1 мм – площа зростає в 2 рази; у випадку зменшенням товщини з 3 мм до 1 мм – площа зростає в 3 рази. Порівняння результатів розрахунків площі поверхні шматочків плодів яблука та груші, які одержані експериментальним шляхом та в результаті моделювання плодів, вказують на адекватність запропонованих розрахункових моделей.

**Список посилань**

1. Макарова, Н. А. Химический состав и антиоксидантные свойства фруктовых чипсов / Н. А. Макарова, Э. В. Мусифуллина, А. Н. Дмитриева // Пищевая промышленность. – 2013. – № 2. – С. 76–78.
2. Королёв, А. А. Разработка технологии производства плодоовощных чипсов : автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.18.01 “Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства” / Королёв Алексей Александрович; ФГБОУ ВПО МГУТУ. – Москва, 2013. – 25 с.
3. Husarova, O. The features of fruits drying in the production of natural chips / O. Husarova, R. Shapar / International youth science forum “Litteris et artibus”. – Lviv, 2017. – P. 44–45.
4. Kovalska, H. Development of apple chips technology / H. Kovalska, A. Marzec, J. Kovalska, K. Samborska, M. Tywonek, A. Lenart // Heat and mass transfer. – 2018. – № 54. – P. 3573–3586.
5. Забалуева, Ю.Ю. Сравнительная характеристика пищевой ценности фруктовых чипсов / Ю. Ю. Забалуева, Н. В. Колесникова, Т. Ц. Федорова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2011. – № 1. – С. 155–156.
6. Шапар, Р. О. Аналіз інноваційних технологій для виробництва фруктових чіпсів / Р. О. Шапар, О. В. Гусарова // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т. 39, № 3. – С. 53–59.
7. Хазимов, К. М. Интенсификация процесса сушки продуктов растительного происхождения с использованием солнечной энергии : дисс. на соиск. учен. степени докт. философ. (PhD) : спец. 6D080600 – “Аграрная техника и технология” / Хазимов Канат Мухатович; Казахский национальный аграрный университет. – Алматы, 2015. – 201 с.
8. Калашников, Г. В. Оценка тепловой эффективности технологической схемы производства яблочных чипсов и сушеных плодов / Г. В. Калашников, Е. В. Литвинов // Вестник ВГУИТ. – 2014. – № 3. – С. 11–17.
9. Маяцкая, И. А. Математическое моделирование растительных объектов с помощью многоугольников Безвиконной / И. А. Маяцкая, Б. М. Демченко // Интернет-журнал “Науковедение”. – 2013. – № 3. – С. 1–4.
10. Антипов, С. Т. Разработка математической модели процесса сушки плодов черной смородины в вакуум-аппарате с СВЧ-энергоподводом / С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, С. А. Виниченко // Вестник ВГУИТ. – 2014. – № 1. – С. 7–12.

---

**REASONING OF NON-MIXING METHOD OF MIXTURE FORMING FROM BULK MATERIALS****I. Dudarev, I. Taraymovich**Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---

**Key words:**

mixture of bulk materials,  
mixing method,  
non-mixing technology,  
mixture quality,  
size of mixture sample

**Article history:**

Received 25.02.2020

Accepted 17.05.2020

**Corresponding author:**

i\_dudarev@ukr.net

**ABSTRACT**

*The mixing process is the main technological operation in the premixes production. It is important to ensure the uniform distribution of components in mixtures from which premixes are made, because the quality of the mixture effects on the premixes efficiency and safety. Mixtures of premixes contain components in microdoses. The ratio between the components of the mixture may be 1:10 or more. It is impossible to ensure the high quality of such mixture by mixing the components. The non-mixing method of mixture forming can provide uniform distribution of components in such mixture. The new non-mixing method of mixture forming from bulk materials is proposed in the article. According to this method, the mixture is formed from elementary mixture volumes, which provides the necessary ratio between the components. The components with different properties and parameters can be mixed by this method. As a result of theoretical studies, the equations have been obtained which allows to substantiate the elementary volume of the mixture. If the mixture of components is formed from elementary volumes of the mixture by equipment, then the index of mixture quality will be very high. In addition, the equations have been obtained which allows to calculate the mass of components microdoses for forming the elementary volume of the mixture from bulk components.*

---

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.295>

---



УДК 621.929.1

## ОБҐРУНТУВАННЯ НОНМІКСИНГОВОГО СПОСОБУ ФОРМУВАННЯ СУМІШІ ІЗ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

І.М. Дударев, І.В. Тараймович

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*Змішування є основною технологічною операцією під час виробництва преміксів для тварин. У сумішах, з яких виготовляють премікси, важливо забезпечити рівномірний розподіл компонентів, оскільки від цього залежать ефективність використання преміксів та їх безпечність. Суміші преміксів містять окремі компоненти в мікродозах, відповідно співвідношення між компонентами суміші може становити 1:10 та більше. Забезпечити високу якість такої суміші шляхом змішування компонентів неможливо. Рівномірний розподіл компонентів за об'ємом такої суміші можуть забезпечити нонміксингові способи формування сумішей. У статті обґрунтовано спосіб нонміксингового отримання суміші, що передбачає її формування з елементарних об'ємів суміші, в яких забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. Цей спосіб дозволяє формувати суміш із компонентів із різними фізико-механічними властивостями та геометричними параметрами. У результаті теоретичних досліджень отримана залежність, яка дозволяє обґрунтувати елементарний об'єм суміші для реалізації запропонованого способу формування суміші. У разі формування технічними засобами елементарних об'єм суміші такої величини, можна отримати суміш високої якості, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального. Крім того, отримані залежності, які дозволяють розрахувати масу мікродоз компонентів для формування елементарного об'єму суміші та, відповідно, обґрунтувати режим роботи дозаторів.*

**Ключові слова:** суміш сипких матеріалів, спосіб змішування, нонміксингова технологія, якість суміші, розмір проби суміші.

### Стан питання та постановка проблеми

Традиційно у комбікормовому виробництві приготування сумішей із сипких компонентів відбувається шляхом їх змішування. У результаті змішування важливо отримати суміш із високою однорідністю розподілу компонентів. Високу однорідність суміші надзвичайно складно забезпечити за допомогою відомих конструкцій

змішувачів, особливо під час змішування компонентів у співвідношенні 1:10 і більшому та у випадку, якщо компоненти мають фізико-механічні властивості та геометричні характеристики, які суттєво відрізняються. Така проблема характерна для виробництва преміксів для тварин, що містять мікроелементи, вітаміни, терапевтичні препарати та біологічно-активні речовини, які необхідно вносити в суміш у невеликій кількості. Крім того, під час приготування сумішей із таких компонентів шляхом змішування можливе явище сегрегації, тобто розшарування компонентів у суміші внаслідок різних розмірів, властивостей та форми частинок компонентів [1], що не дозволяє отримати однорідну суміш та погіршує якісні та кількісні показники кінцевого продукту. А для такої продукції комбікормового виробництва як біодобавки та мінерально-вітамінні добавки від однорідності суміші, з якої їх виготовляють, суттєво залежать ефективність і безпечність їх використання під час годівлі тварин.

Теоретичному обґрунтуванню процесу змішування сипких матеріалів та огляду конструкцій змішувачів присвячені праці [2 – 7], в яких виокремлюється два способи змішування – періодичний та неперервний. Відповідно до цих способів змішування розрізняють змішувачі періодичної та неперервної дії. Змішування компонентів у змішувачах періодичної дії проходить у робочих камерах постійного об'єму з одночасним або по черговим завантаженням компонентів у необхідному співвідношенні. Режим роботи таких змішувачів має забезпечити однорідність суміші за об'ємом, що складно досягнути, оскільки переміщення частинок компонентів у робочій камері має, здебільшого, випадковий характер. Змішування компонентів у змішувачах неперервної дії відбувається у неперервному потоці компонентів всередині робочої камери. Режим роботи змішувачів неперервної дії має забезпечити однорідність суміші у поперечному перерізі потоку. Неперервний спосіб забезпечує кращу якість суміші у порівнянні із періодичним. До способів змішування, які також забезпечують високу якість суміші, можна віднести спосіб неперервного порційного змішування компонентів [8], який передбачає формування багат шарового потоку компонентів (кількість шарів потоку рівна кількості компонентів) із розділенням його на порції, у кожній з яких забезпечено необхідне співвідношення компонентів, з подальшим перемішуванням компонентів в кожній порції окремо та об'єднанням порцій в суміш.

Поширення набувають способи приготування суміші із сипких компонентів, які не передбачають їх змішування. Ці способи отримали

назву нонміксингових способів (технологій) [9, 10]. Вони полягають в упорядкованому рівномірному розподілі мікродоз компонентів в певному об'ємі або потоці шляхом нашаровування мікродоз одна на другу. Для реалізації цих способів запропоновані конструкції формувачів суміші двох типів [9, 11]: конвеєрні, в яких формування суміші здійснюється шляхом накладання шарів компонентів один на другий, та роторні, в яких суміш формується у циліндричній місткості внаслідок розташування шарів компонентів у формі секторів один над другим у різній послідовності. Однорідність суміші, що сформована нонміксинговими способами, у 2...2,5 рази вища [9], ніж за реалізації традиційних способів змішування.

Таким чином, способи отримання суміші, що не передбачають змішування компонентів, є більш перспективним, оскільки забезпечують кращу якість суміші, ніж традиційні способи змішування, тому дослідження в цьому напрямі є актуальними.

**Мета дослідження** – обґрунтування нонміксингового способу формування суміші із сипких матеріалів.

### **Матеріали і методи**

Теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях теорії змішування сипких матеріалів, згідно якої, показником, що характеризує якість суміші, є рівномірність розподілу компонентів у заданому співвідношенні за об'ємом суміші. Під час моделювання частинок сипких матеріалів та елементарних об'ємів їх сумішей використовували метод ідеалізації. Припускали, що усі частинки сипкого матеріалу мають сферичну форму однакового діаметра та однакові фізико-механічні властивості.

### **Результати дослідження та обговорення**

Якість суміші сипких матеріалів (компонентів) характеризується рівномірністю розподілу частинок кожного компонента за об'ємом суміші. Розглянемо розподіл частинок компонентів в об'ємі суміші на прикладі суміші із двох компонентів, що змішані у співвідношенні 1:1. Нехай, частинки компонентів мають сферичну форму, однаковий діаметр та однакові фізико-механічні властивості. Також припускаємо, що частинки компонентів мають кубічне розташування (вкладання) у шарі суміші (рис. 1, а). Якщо в бінарній суміші у будь-якому місці виокремити три взаємно перпендикулярні елементарні шари (товщиною в одну частинку) і в кожному елементарному шарі суміші частинки компонентів будуть розташовані у шаховому порядку (рис. 1, б), то розподіл компонентів у такій суміші можна вважати ідеальним. На практиці отримати суміш із ідеальним розподілом частинок

компонентів шляхом їх перемішування неможливо. Такий розподіл частинок компонентів можна отримати лише у випадку формування суміші, тобто розташування частинок компонентів у кожному елементарному шарі суміші в необхідному порядку (залежно від співвідношення і кількості компонентів).

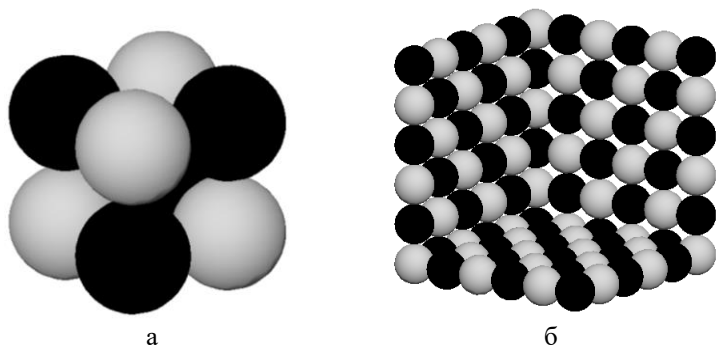


Рис. 1 – Моделі бінарної суміші з частинок сферичної форми:  
а – модель кубічного розташування частинок компонентів; б – модель трьох взаємно перпендикулярних елементарних шарів суміші

Розглянемо теоретичні передумови формування суміші у нонміксинговий спосіб (без змішування компонентів), яка за показником якості має наближатися до ідеальної суміші, тобто мати розподіл компонентів близький до ідеального. У такій суміші в кожному її елементарному об'ємі має бути забезпечено співвідношення між компонентами, яке задане для суміші. Для сипких компонентів співвідношення між компонентами – це співвідношення між масами компонентів із яких формується суміш. Елементарний об'єм суміші – це найменший її об'єм, в якому можна забезпечити необхідне співвідношення між компонентами. На величину елементарного об'єму суміші впливають геометричні характеристики та фізико-механічні властивості частинок сипких компонентів. Продемонструємо на прикладах, як визначається елементарний об'єм суміші, що містить компоненти, які мають частинки сферичної форми з однаковими фізико-механічними властивостями, зокрема масою, та однаковими геометричними характеристиками (діаметром).

Для бінарної суміші із співвідношенням компонентів 1:1 елементарний об'єм суміші буде містити дві частинки (рис. 2, а), причому по одній частинці кожного компонента. Якщо ж у бінарній

суміші співвідношення між компонентами становить 1:2, то елементарний об'єм суміші буде містити три частинки, причому одну частинку першого компонента та дві частинки другого компонента (рис. 2, б). Якщо суміш містить три компонента із співвідношенням 1:1:1, то елементарний об'єм суміші буде містити три частинки (рис. 2, в), причому по одній частинці кожного компонента. У випадку, коли суміш містить три компонента із співвідношенням 1:1:2, то елементарний об'єм суміші буде містити чотири частинки (рис. 2, в), причому по одній частинці перших двох компонентів і дві частинки третього компонента. Необхідно зауважити, що за будь-якого співвідношення компонентів та їх кількості у суміші, послідовність розташування частинок компонентів в елементарному об'ємі суміші не має значення.

Узагальнюючи зазначене вище, визначимо послідовність наближеного розрахунку елементарного об'єму суміші із довільною кількістю компонентів та довільним їх співвідношенням у суміші. Урахуємо, що кожен сипкий матеріал (компонент) містить сукупність дискретних частинок. Нехай, усі частинки одного компонента мають однакові фізико-механічні властивості та геометричні характеристики. Розглянемо суміш до якої входить  $n$  компонентів, співвідношення між якими  $1:k_1:k_2: \dots :k_{n-1}$  (зауважимо, що у будь-якому співвідношенні компонентів у суміші значення "1" характеризує компонент, що має найменший вміст у суміші), причому  $1 \leq k_1 \leq k_2 \leq \dots \leq k_{n-1}$ . Позначимо масу частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, через  $m_{ч.к.1}$ . Елементарний об'єм має містити лише одну частинку компонента, що має найменший вміст у суміші. За відомою масою  $m_{ч.к.1}$  частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, а також урахуовуючи співвідношення між компонентами у суміші, визначається маса усіх решти компонентів в елементарному об'ємі суміші:

$$m_{\sum ч.к.n} = k_{n-1} m_{ч.к.1}, \quad (1)$$

де  $m_{\sum ч.к.n}$  – маса частинок (частинки) компоненту  $n$  в елементарному об'ємі суміші, кг;  $k_{n-1}$  – коефіцієнт співвідношення між компонентом  $n$  (причому  $n \neq 1$ ) та компонентом, що має масу  $m_{ч.к.1}$ ;  $m_{ч.к.1}$  – маса частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, кг.

Об'єм, що займає частинка компонента з масою  $m_{ч.к.1}$  в елементарному об'ємі суміші (наближено):

$$V_{ч.к.1} = m_{ч.к.1} / \rho_1, \quad (2)$$

де  $V_{ч.к.1}$  – об'єм, що займає частинка компонента з масою  $m_{ч.к.1}$  в елементарному об'ємі суміші, м<sup>3</sup>;  $\rho_1$  – насипна густина компонента, що має найменший вміст у суміші, кг/м<sup>3</sup>.

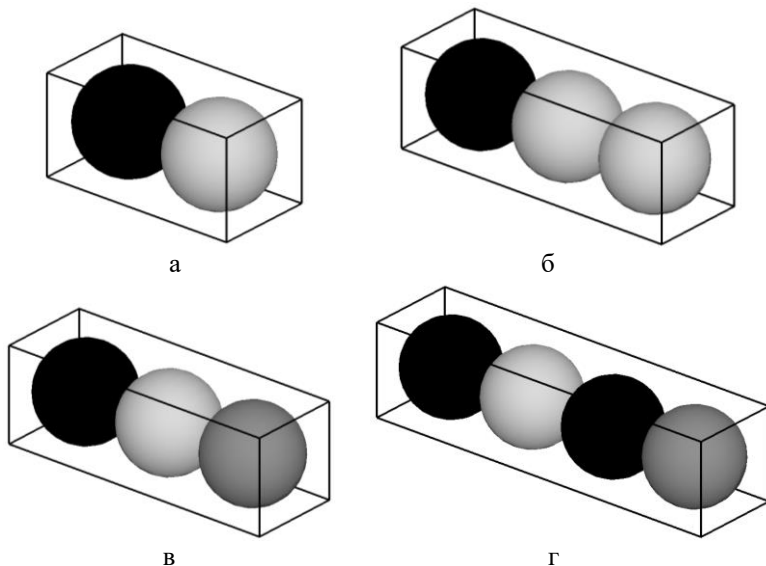


Рис. 2 – Схеми до визначення елементарних об'ємів сумішей:  
 а – бінарна суміш із співвідношенням компонентів 1:1; б – бінарна суміш із співвідношенням компонентів 1:2; в – суміш трьох компонентів із їх співвідношенням 1:1:1; г – суміш трьох компонентів із їх співвідношенням 1:1:2

За відомим значенням маси  $m_{\Sigma_{ч.к.п}}$  визначається об'єм, що займають частинки цього компонента в елементарному об'ємі суміші (наближено) та їх кількість, відповідно, за виразами:

$$V_{\Sigma_{ч.к.п}} = \frac{m_{\Sigma_{ч.к.п}}}{\rho_n} \quad \text{та} \quad N_{\Sigma_{ч.к.п}} = \frac{m_{\Sigma_{ч.к.п}}}{m_{ч.к.п}}, \quad (3)$$

де  $V_{\Sigma_{ч.к.п}}$  – об'єм, який займають частинки компонента  $n$  в елементарному об'ємі суміші ( $n \neq 1$ ),  $\text{м}^3$ ;  $\rho_n$  – насипна густина компонента  $n$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $N_{\Sigma_{ч.к.п}}$  – кількість частинок компонента  $n$  в елементарному об'ємі суміші ( $n \neq 1$ ), шт.;  $m_{ч.к.п}$  – маса частинки компонента  $n$ , кг.

Тоді елементарний об'єм суміші з  $n$  компонентів:

$$V_{ел.об.} = V_{ч.к.1} + \sum_{i=2}^n V_{\Sigma_{ч.к.п}} = m_{ч.к.1} \left( \frac{1}{\rho_1} + \sum_{i=2}^n \frac{k_{n-1}}{\rho_n} \right). \quad (4)$$

Розрахунок елементарного об'єму суміші за виразом (4) є наближеним, оскільки під час розрахунку не були враховані фактори, які впливають на його значення, зокрема, розташування частинок компонентів одна відносно одної в елементарному об'ємі, відмінність властивостей та геометричних параметрів частинок як одного компонента, так і різних компонентів. Тому для визначення якісного показника суміші, що сформована у нонміксинговий спосіб, доцільно приймати елементарний об'єм суміші рівним найменшому об'єму суміші, який може сформувати технічний засіб (як правило, дозатори мікродоз компонентів). Разом із тим, чим ближче значення елементарного об'єму суміші, що можуть сформувати технічні засоби, до розрахованого за виразом (4), тим кращої якості суміш можна отримати, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального.

У більшості випадків необхідно сформувати суміш із декількох (більше двох) компонентів у різних співвідношеннях. Причому компоненти відрізняються за фізико-механічними властивостями та геометричними характеристиками частинок. На практиці оцінити якість такої суміші можна шляхом визначення співвідношення компонентів у пробах, які відібрані із різних місць суміші. Об'єм проби суміші має бути рівний найменшому об'єму суміші, який можна сформувати із компонентів у необхідному співвідношенні за допомогою технічних засобів. Причому об'єм проби має наближатися до елементарного об'єму суміші. Таким чином, щоб отримати суміш, яка за якісними показниками буде наближатися до ідеальної, необхідно, щоб у кожному найменшому об'ємі суміші, який можна сформувати технічними засобами, було забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. Для формування такої суміші можна використати матрицю (рис. 3), яка містить комірки кубічної форми, об'єм яких рівний найменшому об'єму суміші, який можуть сформувати технічні засоби. У кожному комірці матриці технічні засоби (дозатори мікродоз) одночасно або послідовно спрямовують компоненти у кількості, необхідній для забезпечення заданого співвідношення компонентів у суміші. Причому комірка має бути заповнена компонентами повністю. При завантаженні усіх комірок матриці утворюється елементарний шар суміші, в кожному елементарному об'ємі якого, що може бути забезпечений технічними засобами, дотримане необхідне співвідношення між компонентами. При накладанні таких елементарних шарів один на другий формується суміш компонентів. Для реалізації запропонованого способу нонміксингового формування суміші розроблено формувач суміші

сипких матеріалів [12]. Нонміксинговий спосіб доцільно використовувати для формування сумішей із співвідношенням компонентів 1:10 та більшим, в яких необхідно забезпечити точний вміст (мікродозу) певного компонента в елементарному об'єму суміші, перевищення якого недопустиме, оскільки значна концентрація компонента може зумовити небезпечність готової продукції, а недостатня концентрація – може зробити продукцію неефективною.

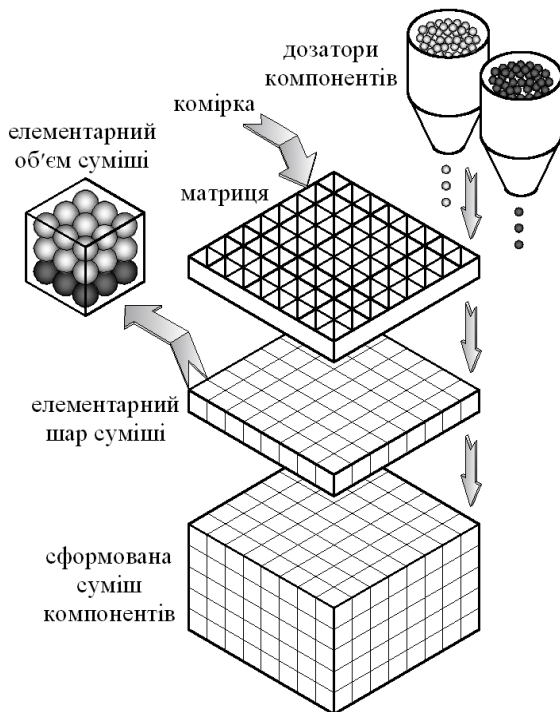


Рис. 3 – Схема нонміксингового способу формування суміші із сипких матеріалів

Необхідно зауважити, що в комірці матриці частинки компонентів не є перемішаними. Вони розташовані або шарами один над другим у порядку завантаження в комірку (рис. 4, а), або мають випадкове розташування (рис. 4, б). Розташування частинок сипких компонентів залежить від їх геометричних характеристик та фізико-механічних властивостей.



Покращити якість суміші, що утворена в нонміксинговий спосіб, можна, якщо завантажувати компоненти в сусідні комірки матриці у різній послідовності (рис. 5, а) або ж забезпечувати перемішування компонентів ще на етапі завантаження у комірку матриці, тобто одночасне завантаження (рис. 5, б).

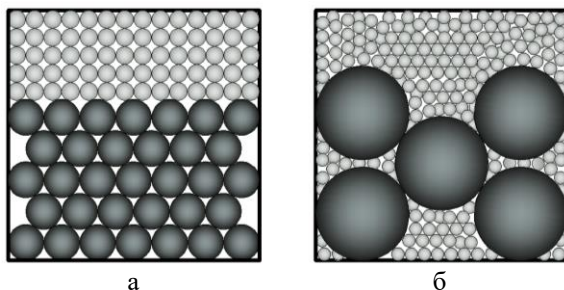


Рис. 4 – Схеми розташування компонентів суміші в комірці матриці:  
а – пошарове розташування; б – випадкове розташування

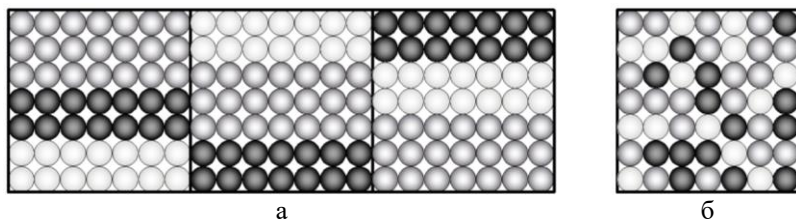


Рис. 5 – Способи завантаження компонентів у комірку матриці:  
а – завантаження у різній послідовності; б – одночасне завантаження

Нонміксинговий спосіб формування суміші із використанням матриці дозволяє отримати суміш із детермінованою структурою, в якій шар суміші складається із елементарних шарів, кожен з яких, в свою чергу, утворений з елементарних об'ємів суміші, у кожному з яких забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. У такий спосіб формування суміші досягається рівномірний розподіл сипких компонентів за об'ємом суміші, що близький до ідеального, незалежно від необхідного співвідношення сипких компонентів та їх властивостей і характеристик.

Визначимо залежності, що необхідні для розрахунку маси сипких компонентів (мікродоз) для їх завантаження в комірку матриці в

необхідному співвідношенні. Нехай, компоненти у комірку матриці завантажуються пошарово, причому шари компонентів не перемішуються. Співвідношення між масами  $n$  компонентів, що необхідне для формування суміші, можна записати у вигляді:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{k_1}, \frac{m_1}{m_3} = \frac{1}{k_2}, \frac{m_1}{m_4} = \frac{1}{k_3}, \dots, \frac{m_1}{m_n} = \frac{1}{k_{n-1}}, \quad (5)$$

або

$$m_2 = k_1 m_1, \quad m_3 = k_2 m_1, \quad m_4 = k_3 m_1, \quad \dots, \quad m_n = k_{n-1} m_1, \quad (6)$$

де  $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_n$  – маси, відповідно, першого, другого, третього, четвертого та  $n$ -го компонентів, які необхідні для формування елементарного об'єму суміші у заданому співвідношенні між компонентами, кг;  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n-1}$  – коефіцієнти співвідношення, відповідно, між другим, третім, четвертим,  $n - 1$  компонентами (причому  $n \neq 1$ ) та першим компонентом, що має масу  $m_1$ .

Маса  $n$ -го компонента визначається за виразом:

$$m_n = V_n \rho_n, \quad (7)$$

де  $V_n$  – об'єм, який займає  $n$ -й компонент масою  $m_n$ , м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – насипна густина  $n$ -го сипкого компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Після підстановки виразу (7) у рівняння (6), після перетворень отримаємо рівняння:

$$V_2 = k_1 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad V_3 = k_2 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_3}, \quad V_4 = k_3 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_4}, \quad \dots, \quad V_n = k_{n-1} V_1 \frac{\rho_1}{\rho_n}, \quad (8)$$

де  $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  – об'єм, який, відповідно, займає перший, другий, третій, четвертий та  $n$ -й компонент у комірниці матриці, м<sup>3</sup>;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \dots, \rho_n$  – насипна густина, відповідно, першого, другого, третього, четвертого та  $n$ -го сипкого компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Оскільки комірка матриці заповнена компонентами повністю, тоді об'єм комірки, який відомий, рівний сумі об'ємів усіх компонентів, що завантажуються в комірку у необхідному співвідношенні (за умови, що компоненти розташовані в комірниці шарами один над другим, тобто не перемішуються):

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n, \quad (9)$$

де  $V$  – об'єм комірки матриці, м<sup>3</sup>.

Після підстановки у вираз (9) рівнянь (8), отримаємо:

$$V_1 = \frac{V}{\left(1 + k_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} + k_2 \frac{\rho_1}{\rho_3} + k_3 \frac{\rho_1}{\rho_4} + \dots + k_{n-1} \frac{\rho_1}{\rho_n}\right)}. \quad (10)$$

Після підстановки значення об'єму  $V_1$ , що розраховане за виразом (10), у рівняння (8), розраховуються об'єми компонентів  $V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ , що необхідні для їх завантаження в комірку матриці у заданому співвідношенні. За розрахованими значеннями об'ємів компонентів  $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  визначається маса кожного компонента, яка необхідна для їх завантаження в комірку матриці у заданому співвідношенні:

$$m_1 = V_1 \rho_1, m_2 = V_2 \rho_2, m_3 = V_3 \rho_3, m_4 = V_4 \rho_4, \dots, m_n = V_n \rho_n. \quad (11)$$

Залежності (11) дозволяють обґрунтувати режим роботи дозаторів мікродоз компонентів, що забезпечить високу якість суміші, яка сформована у нонміксинговий спосіб. Таким чином, ефективність способу нонміксингового формування суміші компонентів у значній мірі залежить від роботи дозаторів компонентів, зокрема від того, наскільки малу дозу сипкого компонента вони можуть сформувати із урахуванням фізико-механічних властивостей та геометричних характеристик його частинок. Оскільки, що менший елементарний об'єм суміші, який формується дозаторами із мікродоз компонентів, то більш рівномірний розподіл компонентів за об'ємом суміші і, відповідно, краща її якість.

### Висновки

Обґрунтований спосіб нонміксингового формування суміші із сипких компонентів дозволяє забезпечити рівномірний розподіл компонентів за об'ємом суміші, який близький до ідеального. У цей спосіб можна змішувати сипкі компоненти, що мають різні фізико-механічні властивості та геометричні характеристики частинок, із співвідношенням компонентів у суміші 1:10 та більшим. Отримана залежність, яка дозволяє обґрунтувати елементарний об'єм суміші для реалізації запропонованого способу формування суміші. У разі формування технічними засобами елементарних об'єм суміші такої величини, можна отримати суміш високої якості, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального. Також отримані залежності, які дозволяють розрахувати масу мікродоз компонентів для формування елементарного об'єму суміші та, відповідно, обґрунтувати режим роботи дозаторів.

### Список посилань

1. Балагуров, И. А. Кинетика формирования многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.17.08 – “Процессы и аппараты химических технологий” / Балагуров Иван Александрович; ФГБОУВО “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”. – Иваново, 2018. – 131 с.

2. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
3. Harnby, N. Mixing in the process industries (Second edition) / N. Harnby, M. F. Edwards, A. W. Nienow. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p. <http://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3760-2.X5020-3>
4. Berthiaux, H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology / H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology. – 2005. – № 157 (1–3). – P. 128–137. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>
5. Bridgwater, J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective / J. Bridgwater // Particuology. – 2012. – № 10 (4). – P. 397–427. <http://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
6. Верлока, И. И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И. И. Верлока, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев // Электронный научный журнал “Инженерный вестник Дона”. – 2014. – № 4. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599>
7. Техника переработки пластмасс / Под. Ред. Н. И. Басова, В. Броя. – М. : Химия, 1985. – 528 с.
8. Dudarev, I. Modeling of mixing bulk materials / I. Dudarev, R. Kirchuk, Y. Hunko, S. Panasyuk // In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2020. – P. 54–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_6)
9. Евсеев, А. В. Нонмиксинговые технологии и оборудование для получения многокомпонентных смесей / А. В. Евсеев, М. С. Парамонова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 8. Ч. 2. – С. 188–194.
10. Евсеев, А. В. Новый критерий оценки качества смесей сыпучих материалов / А. В. Евсеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 11. Ч. 1. – С. 139–147.
11. Васин, В. М. Способ смешивания сыпучих материалов и математические модели потоков их частиц / В. М. Васин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 1. – С. 9–18.
12. Патент №141534 UA, МПК В01F3/18, В01F7/00, В01F7/08. Формувач суміші сипких матеріалів / Дударев І. М.; заявл. 28.10.2019; опубл. 10.04.2020; Бюл. № 7, 2020 р.

---

**ENERGY CALCULATION OF THE SPIRAL DRYER****L. Zabrodotska, S. Khomych, V. Yanush, Yu. Muravynets**Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---

**Key words:**

drying,  
spiral dryer,  
specific expenses,  
drying agent,  
energy calculation

**Article history:**

Received 15.01.2020

Accepted 17.05.2020

**Corresponding author:**

zabrodotskalyudmila@  
lutsk-ntu.com.ua

**ABSTRACT**

*The article proposes a block diagram of the process of drying bulk plant materials in a spiral dryer, which covers a set of parameters that determine the drying result. To carry out energy-efficient high-quality drying of bulk agricultural materials and control the drying process in a dryer with spiral perforated surfaces, it is necessary to find such parameters of the dryer and drying agent that provide minimal heat and electricity consumption the required performance of the spiral dryer and the initial parameters of the bulk agricultural material. To assess the energy efficiency of the design of the spiral dryer, the specific energy consumption is set: for the drive of the drying chamber and the loading auger; on the formation of the drying agent; to inject the formed drying agent into the drying chamber and pass it through the entire volume of material at a given speed; for the operation of loading and unloading devices with the required bandwidth, the type of which may vary depending on the scheme of organization of the technological process. The presence of several spiral perforated surfaces allows reducing the height of the layers of bulk material on the turns of the perforated surfaces and leads to an increase in the contact area of the drying agent with the material. Due to this, uniform drying of the bulk agricultural material and efficient use of the energy potential of the drying agent is achieved.*

---

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.306>

---

УДК 631.365

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПІРАЛЬНОЇ СУШАРКИ

Л.Ю. Забродоцька, С.М. Хомич, В.О. Януш, Ю.В. Муравинець

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*У статті запропоновано структурну схему процесу сушіння сипких рослинних матеріалів у спіральній сушиарці, яка охоплює комплекс параметрів, що визначають результат сушіння. Для здійснення енергоощадного якісного сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів і керування процесом сушіння у сушиарці зі спіралеподібними перфорованими поверхнями, необхідно знайти такі параметри сушиарки та сушильного агента, які забезпечують мінімальні витрати тепла та електроенергії, необхідну продуктивність спіральної сушиарки та вихідні параметри матеріалу. Для оцінки енергетичної ефективності конструкції спіральної сушиарки встановлені витрати енергії: на привод сушильної камери і завантажувального шнека; на формування сушильного агента; на нагнітання сушильного агента в сушильну камеру і проходження його крізь весь об'єм сипкого матеріалу із заданою швидкістю; на роботу завантажувальних і вивантажувальних пристроїв із необхідною пропускною здатністю, тип яких може змінюватися залежно від схеми організації технологічного процесу. Наявність кількох спіральних перфорованих поверхонь у сушиарці дозволяє зменшити висоту шарів сипкого матеріалу на витках перфорованих поверхонь та призводить до збільшення площі контакту сушильного агента з матеріалом. За рахунок цього досягається рівномірне сушіння сипкого матеріалу та ефективне використання енергетичного потенціалу сушильного агента.*

**Ключові слова:** сушіння, спіральна сушиарка, витрати енергії, сушильний агент, енергетичний розрахунок.

### Стан питання та постановка проблеми

Створення сучасних технологій та обладнання для сушіння сипких рослинних матеріалів пов'язано із проблемою втрати вартості урожаю через його низькі якісні показники. Що, у свою чергу, зумовлює недоотримання аграріями від 30% до 50% вартості зерна, оскільки понад 70% вивезеного із країни зерна є фуражним [1, 2].

Сучасний рівень техніки для сушіння сипких рослинних матеріалів дозволяє проводити автоматизований процес сушіння залежно від

початкової вологості та температури зерна, регулюючи режим сушіння, а також переоснащувати теплогенератори на відходи біомаси, використовувати теплоту відпрацьованих газів із зони нагрівання, сушіння та охолодження зерносушарки [2].

Серед відомих способів сушіння сипких матеріалів у сільському господарстві найбільш поширений – конвективне сушіння. Для цього способу сушіння розроблено велику кількість різних за конструкцією сушарок: камерні, тунельні, шахтні, стрічкові, спіральні, барабанні, пневматичні, вібраційні [3 – 5]. Встановлено, що за питомими витратами тепла та електроенергії спіральні сушарки сипких рослинних матеріалів є ефективнішими за інші типи сушарок [6, 7, 10].

**Мета дослідження** – розробити методика визначення енергетичних витрат на сушіння сипких рослинних матеріалів у спіральній сушарці.

### Матеріали і методи

Дослідження базувалися на основних положеннях теорії сушіння сипких матеріалів та теорії машин і механізмів. Під час розроблення методики енергетичного розрахунку також ураховувалися особливості конструктивного розрахунку сушарок зі спіральними робочими поверхнями (рис. 1).

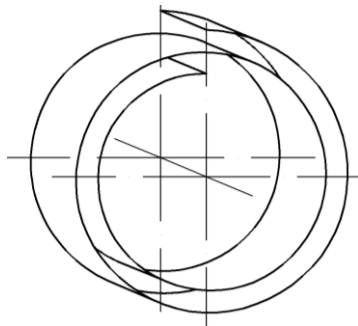


Рис. 1 – Спіральна робоча поверхня

### Результати дослідження та обговорення

Одним із можливих шляхів інтенсифікації процесу сушіння сипкого матеріалу у спіральних сушарках є оптимізація параметрів матеріального та теплового балансів в синтезі із режимними параметрами сушіння та конструктивними параметрами сушарки.

Ураховуючи, що на процес сушіння в спіральних сушарках впливає велика кількість факторів, які здебільшого взаємопов'язані, усі

фактори були згруповані в окремі групи. Таким чином, процес сушіння в спіральних сушарках може бути представлений структурною схемою, яку представлено на рис. 2.



Рис. 2 – Структурна схема процесу сушіння у спіральних сушарках

Для оцінки енергетичної ефективності конструкції спіральної сушарки [8] необхідно встановити питомі витрати енергії [9]:

$$B_{\Delta W} = B_Q + B_N, \quad (1)$$

де  $B_{\Delta W}$  – вартість енергетичних затрат на сушіння сипкого матеріалу від початкової до кінцевої вологості, грн.;  $B_Q$  – вартість тепла,



витраченого на сушіння матеріалу, грн.;  $B_N$  – вартість електроенергії, витраченої на сушіння матеріалу, грн.

Вартість електроенергії, витраченої на сушіння сипкого матеріалу, визначають за формулою [9]:

$$B_N = N_{\text{суш.}} \cdot \Pi_N, \quad (2)$$

де  $N_{\text{суш.}}$  – витрати електроенергії на сушіння сипкого матеріалу від початкової до кінцевої вологості, кВт/год.;  $\Pi_N$  – вартість 1 кВт електроенергії, грн.

Витрати електроенергії на сушіння матеріалу становлять:

$$N_{\text{суш.}} = N_c + N_{\text{в.ш.}} + N_{\text{в.}}, \quad (3)$$

де  $N_c$  – потужність, необхідна для приводу сушарки, кВт;  $N_{\text{в.ш.}}$  – потужність, необхідна для приводу вивантажувального шнека, кВт [4];  $N_{\text{в.}}$  – потужність електродвигуна вентилятора, кВт.

Потужність  $N_c$  (кВт) визначається як загальна потужність на привод сушильної камери і завантажувального шнека із урахуванням ККД приводу [6]:

$$N_c = \frac{1,856 \cdot \gamma_m \cdot D_c^{2,5} \cdot L_c \cdot S_3 + 0,002725 \cdot n_3 \cdot G_{3,ш} \cdot L_{3,ш} \cdot \omega_0}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

де  $\gamma_m$  – питома маса матеріалу, т/м<sup>3</sup>;  $D_c$  – діаметр сушильної камери, м;  $L_c$  – довжина сушильної камери, м;  $S_3$  – коефіцієнт, що враховує заповнення сушильної камери сипким матеріалом;  $n_3 = 1,2$  – коефіцієнт запасу;  $G_{3,ш}$  – продуктивність завантажувального шнека, кг/год. [7];  $L_{3,ш}$  – довжина шнека, м;  $\omega_0 = 1,2$  – коефіцієнт опору середовищу для легких неабразивних матеріалів;  $\eta_{\text{пр}}$  – ККД приводу.

При роботі сушарки енергія також витрачається на вивантаження матеріалу із сушильної камери за допомогою вивантажувального шнека [10]. Потужність, необхідна для приводу вивантажувального шнека, визначається за формулою [10]:

$$N_{\text{в.ш.}} = \frac{n_3 \cdot G_{\text{в.ш.}} \cdot L_{\text{в.ш.}} \cdot \omega_0}{367}, \quad (5)$$

де  $L_{\text{в.ш.}}$  – довжина вивантажувального шнека, м;  $G_{\text{в.ш.}}$  – продуктивність вивантажувального шнека, кг/год.

Потужність  $N_{\text{в.}}$  електродвигуна вентилятора, кВт [10]:

$$N_{\text{в.}} = \frac{Q_{\text{в.}} \cdot H_{\text{в.}}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\text{в.}}}, \quad (6)$$

де  $Q_{\text{в.}}$  – продуктивність вентилятора, м<sup>3</sup>/год.;  $H_{\text{в.}}$  – приведений до густини повітря напір, що розвиває вентилятор, Н/м<sup>2</sup>;  $\eta_{\text{в.}}$  – ККД двигуна вентилятора.

Продуктивність вентилятора визначається за формулою:

$$Q_g = \frac{L}{\rho_{ca}}, \quad (7)$$

де  $L$  – витрата сушильного агента, кг/год.;  $\rho_{ca}$  – густина сушильного агента на виході із сушарки, кг/м<sup>3</sup>.

Витрату сушильного агента визначають за формулою:

$$L = \rho_z \cdot v_z \cdot F_{c_{\text{ши}}}, \quad (8)$$

де  $\rho_z \cdot v_z$  – масова швидкість сушильного агенту, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $F_{c_{\text{ши}}}$  – площа поперечного перерізу сушарки, м<sup>2</sup>.

Вартість тепла, витраченого на сушіння сипкого матеріалу, визначають за формулою [9]:

$$B_Q = Q \cdot \Pi_Q, \quad (9)$$

де  $Q$  – витрати тепла на сушіння матеріалу від початкової до кінцевої вологості, кДж/год.;  $\Pi_Q$  – вартість 1 кДж тепла, грн.

Вартість 1 кДж тепла визначають за формулою [9]:

$$\Pi_Q = \frac{\Pi_n}{Q_B^p \cdot \eta_m}, \quad (10)$$

де  $\Pi_n$  – ціна 1 кг палива, грн.;  $Q_B^p$  – вища теплотворна здатність палива, кДж/кг;  $\eta_m$  – ККД топки.

Витрати електроенергії (кВт) на сушіння сипких рослинних матеріалів [9]:

$$Q = Q_{\text{вип}} + Q_M + Q_K + Q_{c.a}, \quad (11)$$

$$Q_{\text{вип}} = m_g (2480 + 1,85 t_{z.\text{вих}}), \quad (12)$$

$$Q_M = G \cdot c_M (t_{M.K} - t_{н.с}), \quad (13)$$

$$Q_K = 3,96 K_K F_c (t_{z.c} - t_{н.с}), \quad (14)$$

$$Q_{c.a} = L c_z (t_{z.\text{вих}} - t_{н.с}), \quad (15)$$

де  $Q_{\text{вип}}$  – витрата тепла на випаровування вологи, кДж/год.;  $Q_M$  – втрата тепла з висушеним матеріалом, кДж/год.;  $Q_K$  – втрата тепла через циліндричних кожух сушарки, кДж/год.;  $Q_{c.a}$  – втрата тепла із відпрацьованим сушильним агентом, кДж/год.;  $m_g$  – маса вологи, яка випаровується із сипкого матеріалу, кг/год.;  $t_{z.\text{вих}}$  – температура відпрацьованих газів, °С;  $G$  – продуктивність сушарки за сухим матеріалом, кг/год.;  $c_M$  – теплоємність матеріалу, кДж/(кг·°С);  $t_{M.K}$  – температура матеріалу на виході із сушарки, °С;  $t_{н.с}$  – температура навколишнього середовища, °С;  $K_K$  – коефіцієнт теплопередачі через циліндричний кожух, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F_c$  – площа поверхні циліндричного

кожуха (сушильної камери),  $m^2$ ;  $t_{с.с}$  – середня температура у сушарці,  $^{\circ}C$ ;  $L$  – витрата теплоносія,  $кг/год.$ ;  $c_г$  – теплоємність газів на виході із сушарки,  $кДж/(кг \cdot ^{\circ}C)$ .

Маса вологи  $m_e$  ( $кг/год.$ ), яка випаровується із сипкого рослинного матеріалу [3]:

$$m_e = G \frac{W_{поч} - W_{к}}{100 - W_{к}}, \quad (16)$$

де  $G$  – продуктивність сушарки за сипким матеріалом,  $кг/с$ ;  $W_{поч}$  – початкова відносна вологість сипкого рослинного матеріалу,  $\%$ ;  $W_{к}$  – кінцева відносна вологість сипкого рослинного матеріалу,  $\%$ .

Продуктивність  $G$  ( $кг/с$ ) спіральної сушарки за сипким матеріалом визначають за формулою [7]:

$$G = \frac{n_{с.л} m_{с.м} \omega_{с.л}}{(2\pi + n_{с.л} \varepsilon_{роб})} \cdot \frac{(100 - W_{поч})}{(100 - W_{кін})}, \quad (17)$$

де  $n_{с.л}$  – кількість спіральних робочих поверхонь, шт.;  $m_{с.м}$  – маса сформованої порції сипкого матеріалу із початковою відносною вологістю  $W_{поч}$  на першому витку спіральної робочої поверхні,  $кг$ ;  $\omega_{с.л}$  – кутова швидкість обертання спіральної робочої поверхні,  $рад./с$ ;  $\varepsilon_{роб}$  – кут спіральної робочої поверхні, в межах якого відбувається процес сушіння,  $рад$ .

### Висновки

Встановлено основні напрями енергетичних витрат на сушіння сипких рослинних матеріалів у сушарці із спіралеподібною поверхнею сушильної камери. Запропоновано методику енергетичного розрахунку спіральної сушарки, яка дозволить об'єктивно та комплексно проаналізувати вартість енергетичних витрат на сушіння сипкого матеріалу від початкової до кінцевої вологості.

### Список посилань

1. Бондар, О. Сушильне та очисне обладнання для зерна / О. Бондар // Agroexpert : практичний посібник аграрія. – 2009. – №11(16). – С. 102–105.
2. Пазюк, О. Д. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності процесу сушіння зерна / О. Д. Пазюк, І. П. Паламарчук // Вібрації в техніці та технологіяx. – 2010. – №4(60). [Електронний ресурс]. – Режим доступу до журн. : <http://repository.vsau.org/getfile.php/8895.pdf>

3. Дідух, В. Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів : монографія / В. Ф. Дідух. – Луцьк : ЛДТУ, 2002. – 165 с.
4. Патент №85766 UA, МПК F26B11/00, F26B9/08. Барабанна сушарка / Дударев І. М., Кірчук Р. В., Кокалюк Л. Ю.; заявл. 01.06.2007; опубл. 25.02.2009; Бюл. №4, 2009 р.
5. Патент №36392 UA, МПК F26B17/00. Барабанна сушарка / Кокалюк Л. Ю., Дударев І. М., Кірчук Р. В.; заявл. 12.05.2008; опубл. 27.10.2008; Бюл. №20, 2008 р.
6. Забродоцька, Л. Ю. Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав : монографія / Л. Ю. Забродоцька. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – 164 с.
7. Дударев, І. М. Розрахунок машин зі спіральними робочими поверхнями : монографія / І. М. Дударев. – Луцьк : Луцький НТУ, 2017. – 227 с.
8. Патент №104470 UA, МПК F26B11/00, F26B11/02, F26B11/04, F26B17/00. Барабанна сушарка / Дударев І. М.; заявл. 19.05.2014; опубл. 10.02.2016; Бюл. №3, 2016 р.
9. Бехта, П. А. Математичне моделювання та оптимізація процесу сушіння солом'яної стружки в циклонно-спіральній сушарці / П. А. Бехта, Р. О. Козак // Наукові праці Лісівничої академії наук України : збірник наукових праць. – 2013. – №11.
10. Забродоцька, Л. Ю. Визначення енергетичних витрат на сушіння сипких рослинних матеріалів у сушарці / Л. Ю. Забродоцька // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк : ЛНТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 18–23. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до журн. : <http://www.agrmash.info/zb/28/6.pdf>

## METHODS OF RESEARCH THE COEFFICIENTS OF STIFFNESS AND VISCOUS RESISTANCE TO THE DEFORMATION COMPONENTS MANUAL VIBRO SHOCK SHAKER OF THE FRUIT

O. Krupych<sup>1</sup>, R. Shevchuk<sup>1</sup>, R. Krupych<sup>2</sup>, S. Levko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lviv National Agrarian University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Limited Liability Company “Hydraulic Service”, Lviv, Ukraine



### ABSTRACT

*The article proposes methods and devices for determining the coefficients of stiffness and viscous resistance to deformation of the components of a manual vibratory shock shaker of fruits to solve a system of differential equations that describe the shaking process and justify the basic parameters and modes of shaker. For fruit and nut harvesting, it is proposed to supplement the existing manual vibrating fruit shakers with a percussion mechanism that generates shocks when the shaker rod oscillates. The transition to vibro-shock mode requires a theoretical study of the process of interaction of the shaker with the fruit tree to select the basic parameters. Mathematical models are offered in the form of differential equations of the system “manual vibratory shock shaker – fruit branch”. The data of systems of differential equations are very complex and their solution is possible by numerical methods using computer programs. The developed programs introduce parameters that describe the physical and mechanical properties of elements of the manual vibratory shock shaker. The proposed methods allow determining the coefficients of stiffness and viscous resistance to deformation of the components of the manual vibratory shock shaker.*

### Key words:

fruit picking,  
manual shaker,  
stiffness,  
viscous resistance to  
deformation,  
vibration shock

### Article history:

Received 02.04.2020

Accepted 27.05.2020

### Corresponding author:

krupycholeh@gmail.  
com

---

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.299>

УДК 631.358

**МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ ЖОРСТКОСТІ ТА В'ЯЗКОГО ОПОРУ ДЕФОРМУВАННЮ СКЛАДОВИХ РУЧНОГО ВІБРОУДАРНОГО СТРУШУВАЧА ПЛОДІВ****О.М. Крунич<sup>1</sup>, Р.С. Шевчук<sup>1</sup>, Р.О. Крунич<sup>2</sup>, С.І. Левко<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Львівський національний аграрний університет, Львів, Україна<sup>2</sup>ТзОВ “Гідравлік Сервіс”, Львів, Україна

*У статті запропоновані методи та прилади для визначення коефіцієнтів жорсткості та в'язкого опору деформуванню складових ручного віброударного струшувача плодів для розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують процес струшування та дозволяють обґрунтувати основні параметри та режими роботи струшувача. Для збирання фруктів та горіхів існуючі ручні вібраційні струшувачі плодів пропонується доповнити ударним механізмом, що генерує удари під час коливання штока струшувача. Перехід на віброударний режим роботи вимагає теоретичного дослідження процесу взаємодії струшувача з плодовим деревом, щоб вибрати основні параметри та режими роботи струшувачів. Математичні моделі пропонуються у вигляді диференціальних рівнянь системи “ручний віброударний струшувач – плодова гілка”. Дані систем диференціальних рівнянь дуже складні і їх розв'язок можливий числовими методами із використанням комп'ютерних програм. У розроблені програми вводять параметри, що описують фізичні та механічні властивості таких елементів ручного віброударного струшувача: пружини ударного механізму; вузлів та деталей механізму утримування та управління струшувачем, зокрема, амортизаційних пружин, пружної вставки задньої ручки, пружини передньої ручки, еластичної вставки утримуючої планки; еластичної подушки захвату. Запропоновані способи дозволяють визначити коефіцієнти жорсткості та в'язкого опору деформуванню складових елементів ручного віброударного струшувача.*

**Ключові слова:** збирання плодів, ручний струшувач, жорсткість, в'язкий опір деформуванню, віброудар.

**Стан питання та постановка проблеми**

Для збирання плодових та горіхоплідних культур використовують ручний, напівмеханізований та механізований способи збирання. Основоположником плодозбиральних машин Г.П. Варламовим [1]

запропоновано теоретичні основи розрахунку різних типів струшувачів та методики визначення параметрів віброзбурювачів коливань плодів дерев, до яких відносяться жорсткісні та демпфірувальні властивості.

Розробка ударних та віброударних струшувачів [2, 3] передбачала модернізацію існуючих вібраційних збурювачів коливань, що дозволило перейти на ударні та віброударні режими роботи. Запропоновані режими суттєво підвищили повноту знімання без пошкодження кори дерев у місці передачі збурювальних зусиль. Струшувачі обладналися розробленими віброударними механізмами та захватами із гумовими еластичними подушками чи із пустотілими оболонками [2, 3]. Розробниками, у першу чергу, були запропоновані методики дослідження фізико-механічних властивостей елементів запропонованих струшувачів. Ці методики частково можна використати для ручних віброударних струшувачів.

Науковцями пропонуються математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь системи “ручний віброударний струшувач – плодова гілка”. Ці системи диференціальних рівнянь є дуже складними і їх розв’язування можливе числовими методами із використанням комп’ютерних програм. У розроблені програми заносять параметри, що описують фізико-механічні властивості елементів струшувачів, тому дослідження цих параметрів є актуальною задачею для обґрунтування основних параметрів та режимів роботи ручних віброударних струшувачів.

Ураховуючи зазначене вище, необхідно розробити нові чи удосконалити існуючі методики для визначення фізико-механічних властивостей елементів ручних віброударних струшувачів плодів із метою обґрунтування їх оптимальних значень. Ці дані можна буде використати під час теоретичного аналізу процесу знімання плодів із використанням ручних струшувачів, що передають збурювальні зусилля скелетним гілкам. Для теоретичного аналізу пропонуються математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь системи “ручний віброударний струшувач – плодова гілка”. Ці системи рівнянь є дуже складними і їх розв’язування можливе числовими методами із використанням комп’ютерних програм. У розроблені програми заносять параметри, що описують фізико-механічні властивості елементів струшувачів, тому дослідження даних параметрів є актуальною задачею для обґрунтування основних параметрів та режимів роботи ручних віброударних струшувачів.

**Мета дослідження** – розробити методики визначення коефіцієнтів жорсткості та в’язкого опору деформуванню складових ручного

віброударного струшувача плодів для розв'язування системи диференціальних рівнянь, що описують процес знімання плодів і дозволяють обґрунтувати основні параметри та режими роботи запропонованого струшувача.

### Матеріали і методи

Використано методи проведення експериментів для визначення фізико-механічних параметрів гумових та пружних елементів машин та засобів, що характеризуються пружньо-демпфірувальними властивостями. Досліджувалися елементи ручного віброударного струшувача, створеного на базі серійного вібраційного струшувача SC-105 італійської фірми Cifarelli (рис. 1) [4], який використовується для збирання оливок. Базовими елементами серійного вібраційного струшувача є: двигун внутрішнього згоряння, збурювач кривошипно-повзунного типу, штанга, механізм утримання та управління.

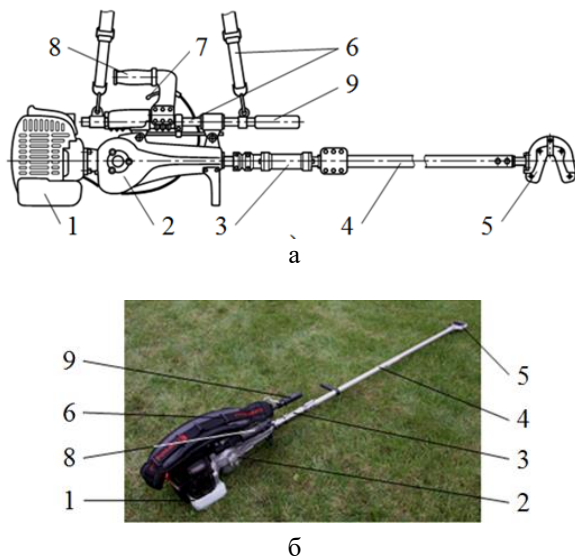


Рис. 1 – Ручний віброударний струшувач плодів:

а – схема; б – загальний вигляд:

- 1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – збурювач коливач кривошипно-повзунного типу; 3 – ударний механізм; 4 – штанга;
- 5 – вилчастий захват; 6 – механізм утримання та управління струшувачем; 7 – важілець управління системою подачі палива двигуна внутрішнього згоряння; 8, 9 – рукоятки



Цей серійний струшувач доповнено розробленими вилчастим захватом та ударним механізмом [5], що дозволило використовувати ручний струшувач на збиранні плодкових та горіхоплідних культур.

Ударний механізм генерує ударний імпульс під час гармонічних вібраційних коливань скелетних гілок. Накладання імпульсу на гармонічні коливання супроводжується значним зростанням прискорення гілок у місці їх захвату. Цим також забезпечується широкий спектр частот струшування гілок, який охоплює діапазон необхідних частот струшування, і досягається висока повнота знімання плодів [5]. Розроблений вилчастий захват містить гумові еластичні подушки для захисту кори гілок від пошкоджень.

Для аналізу процесу знімання плодів ручним віброударним струшувачем і визначення його основних режимів роботи розроблена математична модель із шести рівнянь [6]. Дані щодо жорсткісних та демпфірувальних показників складових частин струшувача заносяться в програму для розв'язування системи диференціальних рівнянь числовим методом Рунге-Кутта.

### Результати дослідження та обговорення

Необхідно дослідити такі складові частини ручного віброударного струшувача (рис. 1): пружину ударного механізму; вузли та деталі механізму утримання і управління струшувачем, зокрема, демпферні пружини кріплення до збурювача коливань, еластичну вставку задньої рукоятки, пружну передню демпферну рукоятку, еластичну вставку утримувальної лямки; еластичні подушки вилчастого захвату.

Коефіцієнти жорсткості визначались за загальноприйнятою методикою. Згідно методики до досліджуваних елементів ступінчасто прикладаються статичні навантаження стиску, розтягу або згину і одночасно вимірюються як навантаження, так і деформація. Значення коефіцієнтів жорсткості розраховуються за залежністю [7]:

$$c = \left( \sum_{i=1}^n P_i x_i \right) / \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right), \quad (1)$$

де  $P$  – прикладена сила, Н;  $x$  – деформація досліджуваного елемента, мм;  $i$  – індекс вимірювання у досліді;  $n$  – число вимірювань, що відповідає числу ступенів навантаження.

Для проведення експериментів використовуються: серійний прилад КИ-40 для перевірки жорсткості пружин (рис. 2) [8]; механічна машина розтягу із пресовим пристосуванням для перетворення зусилля розтягу в зусилля стиску (рис. 3) [3].

На приладі КИ-40 досліджуються жорсткість пружин ударного механізму та механізму утримання і управління струшувачем. Для

цього на столик встановлюється (рис. 2), а потім ступінчасто стискається досліджувана пружина шляхом переміщення кронштейна за допомогою поворотного важеля. На кожному послідовному ступені стиску гвинтом фіксується положення кронштейна на стійці і реєструється сила стиску пружини за показами вагового механізму та деформація – штангенциркулем. Реалізується сім ступенів навантаження, після чого пружина повністю розвантажується й експерименти трикратно повторюються. Коефіцієнти жорсткості досліджуваних пружин розраховуються за виразом (1).

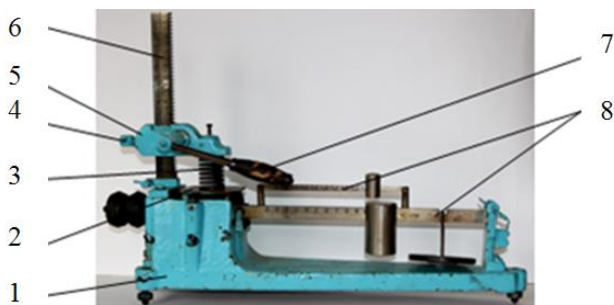


Рис. 2 – Дослідження жорсткості пружин на приладі КИ-40:  
1 – станина; 2 – столик; 3 – досліджувана пружина; 4 – затискний гвинт; 5 – рухомий кронштейн; 6 – зубчаста стійка; 7 – поворотний важіль; 8 – ваговий механізм

Значення жорсткості еластичних подушок вилчастого захвата та еластичних вставок утримувальної лямки струшувача досліджуються на механічній машині розтягу (рис. 3), що забезпечує прикладання значних зусиль для деформації вказаних елементів [3]. Подушки захвата стискається із використанням пресового пристосування, причому сила стиску збільшується ваговим механізмом вказаної машини від 0 до 5000 Н із кроком 250 Н. За кожного навантаження штангенциркулем реєструється деформація подушок і коефіцієнт жорсткості розраховується за виразом (1).

В аналогічній послідовності визначається жорсткість еластичної вставки утримувальної лямки струшувача. Вставка кріпиться до вух машини розтягу і розтягується зусиллям від 0 до 150 Н із кроком 15 Н. Верхня межа зусилля розтягу вибирається із урахуванням сили тяжіння ручного віброударного струшувача та ймовірних додаткових навантажень у процесі коливань.

Еластична вставка задньої рукоятки струшувача під час досліджень на згин розташовується горизонтально і одна її сторона нерухомо затискається. До іншої вільної сторони вертикально прикладається сила, під дією якої вставка згинається й одночасно реєструється сила і лінійна деформація вставки.

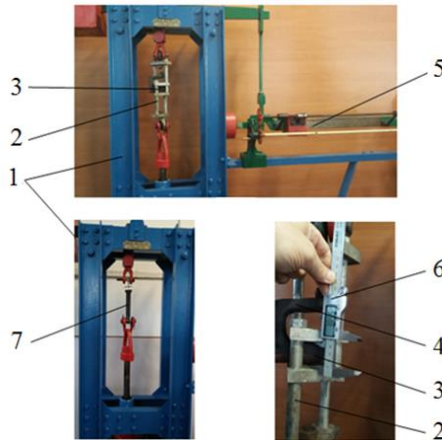


Рис. 3 – Дослідження жорсткості утримувальної лямки та подушок захвата струшувача:

- 1 – машина розтягу; 2 – пресове пристосування; 3, 4 – еластичні подушки захвата; 5 – ваговий механізм; 6 – штангенциркуль; 7 – еластична вставка утримувальної лямки

Для дослідження жорсткості передньої рукоятки струшувача, змонтованої на напрямній штанзі, остання встановлюється вертикально із рукояткою на вершині і нерухомо затискається. До рукоятки вертикально прикладається сила, яка реєструється, й одночасно вимірюється зміщення рукоятки, тобто деформація її пружин.

Експеримент із вставкою задньої рукоятки та передньою рукояткою струшувача проводиться у п'ятикратній повторності зі збільшенням сили, що зумовлює деформацію, від 0 до 250 Н. За отриманими значеннями сили і деформації за виразом (1) розраховується коефіцієнт жорсткості.

Коефіцієнти в'язкого опору  $n_v$  (Н·с/м) елементів ручного віброударного струшувача визначаються шляхом запису згасаючих коливань за формулою [9, 10]:

$$n_g = -2m_g \frac{2\pi}{T_1} \ln \frac{a_{i+1}}{a_i}, \quad (2)$$

де  $m_g$  – маса, що коливається, кг;  $T_1$  – період згасаючих коливань згідно із записаними осцилограмами, с;  $a_i, a_{i+1}$  – послідовні значення амплітуди однаково спрямованих згасаючих коливань, мм.

Для дослідження еластичної вставки утримувальної лямки струшувача використовуються лещата (рис. 4), що закріплюються в Т-подібних пазах робочого стола фрезерного верстата, та вимірювальна апаратура запису осцилограм прискорень згасаючих коливань. Еластична вставка утримувальної лямки вертикально верхнім кінцем кріпиться до лещат, а до вуха нижнього кінця кріпиться акселерометр та металевий стрижень з додатковою масою (рис. 4). Еластична вставка задньої рукоятки струшувача в горизонтальному положенні кріпиться одним кінцем у лещатах (рис. 5).

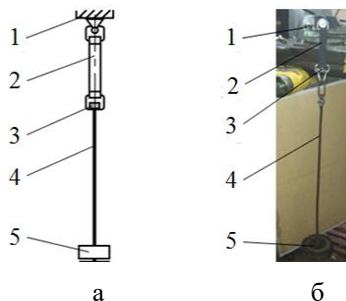


Рис. 4 – Визначення згасаючих коливань еластичної вставки лямки струшувача:

а – схема коливної системи; б – загальний вигляд вставки:

1 – лещата; 2 – еластична вставка утримувальної лямки;

3 – акселерометр; 4 – металевий стрижень; 5 – додаткова маса

Коливання реєструються акселерометром, закріпленим на іншому кінці вставки. Маса  $m_g$  у коливній системі еластичної вставки лямки (рис. 4) визначається як сумарна маса вставки, акселерометра, стрижня і додаткової маси, а для коливної системи еластичної вставки задньої рукоятки (рис. 5) – сума маси самої вставки та маси акселерометра.

До досліджуваних елементів миттєво прикладається зусилля, що забезпечує вільні згасаючі коливання, запис яких здійснюється за допомогою обладнання вимірювання прискорень. Обробка отриманих осцилограм дозволяє визначити послідовні значення амплітуди та

період однаково спрямованих згасаючих коливань, необхідні для встановлення значень коефіцієнтів в'язкого опору  $n_6$ , які розраховуються за залежністю (2).

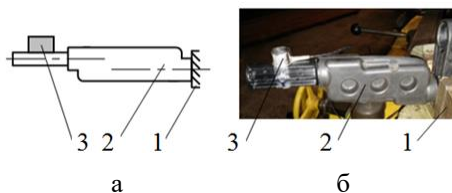


Рис. 5 – Визначення згасаючих коливань

еластичної вставки задньої рукоятки струшувача:

а – схема коливної системи; б – загальний вигляд вставки:

1 – лещата; 2 – еластична вставка задньої рукоятки; 3 – акселерометр

### Висновки

Для підвищення ефективності ручного збирання плодів доцільно використовувати ручні віброударні струшувачі плодів, що забезпечують знімання плодів шляхом передачі збурювальних зусиль скелетним гілкам. Для обґрунтування оптимальних параметрів та режимів струшувача запропоновано математичну модель у вигляді диференціальних рівнянь, розв'язування яких можливе лише числовими методами із використанням комп'ютерних програм. Початковими даними для цих програм є параметри елементів ручного струшувача плодів: пружини ударного механізму; вузлів та деталей механізму утримання і управління струшувачем, зокрема, демпферних пружин, еластичної вставки задньої рукоятки, пружини передньої демпферної рукоятки, еластичної вставки утримувальної лямки; еластичної подушки вилчастого захвата. Запропоновані методики дозволяють визначити коефіцієнти жорсткості та в'язкого опору деформуванню складових ручного віброударного струшувача плодів.

### Список посилань

1. Варламов, Г. П. Машини для уборки фруктів / Г. П. Варламов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 216 с.
2. Гошко, З. О. Дослідження технологічного процесу збирання плодів тросовим струшувачем віброударної дії : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.20.11 / З. О. Гошко; Луцький індустріальний інститут. – Луцьк, 1995. – 263 с.
3. Семен, Я. В. Обґрунтування параметрів і режимів роботи плодозбирального агрегату з акумулятором енергії : дис. на

- здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 “Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва” / Семен Ярослав Васильович; Львівський держ. аграрний ун-т. – Львів, 2007. – 202 с.
4. Shaker SC105. Cifarelli SpA. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.cifarelli.it/documenti/depSC105\\_GB.pdf](https://www.cifarelli.it/documenti/depSC105_GB.pdf)
  5. Шевчук, Р. С. Ручний віброударний струшувач плодів / Р. С. Шевчук, Р. О. Крунич // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк, 2011. – Вип. 21. Том II. – С. 238–243.
  6. Крунич, Р. О. Математична модель системи “ручний віброударний струшувач – плодова гілка” / Р. О. Крунич, І. І. Ніщенко, Р. С. Шевчук, С. О. Крунич // Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник. – ННЦ “ІМЕСГ”, Глеваха, 2019. – Вип. №9(108). – С. 210–223. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-27>
  7. Хайліс, Г. А. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин : навч. посібник / Г. А. Хайліс, Д. М. Коновалюк. – Київ : НМК ВО, 1992. – 320 с.
  8. Практикум з ремонту машин / О. І. Сідашенко та ін.; за ред. О. І. Сідашенка, О. А. Науменка. – Київ : Урожай, 1995. – 224 с.
  9. Иориш, Ю. И. Виброметрия / Ю. И. Иориш. – Москва : Машгиз, 1963. – 569 с.
  10. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики. Ч. 2. / А. А. Яблонский. – Москва : Высшая школа, 1977. – 411 с.

## SCIENTIFIC SUBSTANTIATION FOR DISTRIBUTION OF QUALITY INDICES OF OILSEED FLAX STRAW AND RETTED STRAW ON GRADE CLASSES

O. Nalobina<sup>1</sup>, T. Holovenko<sup>2</sup>, M. Holotiuk<sup>1</sup>,  
P. Ruzhansky<sup>3</sup>, O. Shovkomud<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

<sup>2</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

<sup>3</sup>Higher State Vocational School in Helm, Helm, Poland

AGRICULTURAL MACHINES

AM  
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

### ABSTRACT

*The article develops the methodology of distribution of quality indicators of oilseed flax straw and retted straw by classes (grade). To perform the tasks used the method of multidimensional statistical analysis - cluster analysis. The results of the evaluation are the basis of the procedure of optimal distribution of samples of the studied raw materials into numbers according to the quality indicators obtained experimentally. The study of the basic rules of assessing the level quality of industrial products, as well as the principles of modeling processes and basics of system analysis became the theoretical basis for developing a new complex quality control system for oilseed flax stems and retted straw with scientific substantiation of distribution their quality indicators on numbers. On the basis of clustering indicators, the first time it was proposed to determine the quality of oilseed flax straw and retted straw by five numbers: 5, 4, 3, 2, 1, which allows to predict the feasibility of their industrial processing and functional purpose of the product. For the five numbers of straw, the limit sums of grades are set by three groups of colors, and for the five numbers of retted straw - by three groups of separability.*

### Key words:

oilseed flax,  
cluster,  
quality indicator,  
agglomeration,  
dendrogram

### Article history:

Received 05.04.2020

Accepted 26.05.2020

### Corresponding author:

t.holovenko@lutsk-  
ntu.com.ua

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.303>

УДК 677.11.021

## НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СОЛОМИ ТА ТРЕСТИ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО НА КЛАСИ СОРТНОСТІ

О.О. Налобіна<sup>1</sup>, Т.М. Головенко<sup>2</sup>, М.В. Голотюк<sup>1</sup>,  
П. Ружанські<sup>3</sup>, О.В. Шовкомуд<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

<sup>3</sup>Вища державна професійна школа у Хелмі, Хелм, Польща

---

*У статті розроблено методологію розподілу показників якості соломи та трести льону олійного за класами (сортністю). Для виконання поставлених завдань використано метод багатомірного статистичного аналізу – кластерний аналіз. Результати здійсненої оцінки покладено в основу процедури оптимального розподілу зразків досліджуваної сировини на номери за показниками якості, одержаними експериментальним шляхом. Дослідження основних правил оцінювання рівня якості промислової продукції, а також принципи моделювання процесів та основ системного аналізу стали теоретичним підґрунтям для розроблення нової комплексної системи контролю якості соломи та трести льону олійного з науковим обґрунтуванням розподілу їхніх показників якості на номери. На основі кластеризації показників, вперше запропоновано визначати якість соломи та трести льону олійного за п'ятьма номерами: 5, 4, 3, 2, 1, що дозволяє прогнозувати доцільність їхньої промислової переробки та функціональне призначення отриманої продукції. Для п'яти номерів соломи встановлені граничні суми балів за трьома групами кольору, а для п'яти номерів трести – за трьома групами відокремлюваності. Результати досліджень покладено в основу розроблених нормативних документів для визначення якості соломи та трести льону олійного.*

**Ключові слова:** льон олійний, кластер, показник якості, агломерація, дендрограма.

---

### Стан питання та постановка проблеми

Глибокі соціально-економічні зміни, які відбулися в Україні в період незалежності призвели до знищення цілих галузей народного господарства. Серед них легка промисловість, що втратила свої позиції



з багатьох причин, зокрема через знищення вітчизняної сировинної бази [1]. Аналітична оцінка напрямів розвитку світової легкої промисловості свідчить про те, що виробники віддають перевагу натуральній сировині – льону та технічній коноплі, вироби з якої користуються великим попитом. Україна має потужний потенціал для розвитку виробництва із виготовлення різноманітних виробів на основі лляної сировини, зокрема льону олійного [2]. Нині українськими науковцями напрацьовано значну кількість інноваційних продуктів (техніка та технології), запровадження яких сприятиме відродженню та швидкому розвитку виробництва із вирощування, переробки льону олійного та виготовлення продукції галузевого призначення [3]. Але, як відомо, для забезпечення конкурентоздатності виробів, основою яких є висока якість, необхідним стає державне регулювання та контроль продукції. В основу цих процесів покладено державні стандарти, що є комплексною системою оцінки якості [4].

У попередніх дослідженнях [4], на підставі кваліметричних розрахунків, визначено вагомні показники якості соломи і трести льону олійного, що впливають на їхню технологічну цінність як сировини промислового застосування (таблиця 1).

Таблиця 1 – Показники якості і граничні значення соломи та трести льону олійного для визначення номера

№	Якісні характеристики	Граничні значення
Для визначення номера соломи		
1	Вихід лубу зі стебел, %	11,0...40,0
2	Засміченість, %	5,0...20,0
3	Група кольору соломи	I, II, III
Для визначення номера трести		
1	Вихід волокна, %	11,0...40,0
2	Засміченість, %	5,0...20,0
3	Група кольору волокна (показник кольору волокна)	I, II, III, IV (1,0...4,0)
4	Відокремлюваність, од. (ступінь вилежаності трести; інтенсивність відбитого світлового потоку, люкс)	- 4,1 і більше (вилежана; менше 23); - від 3,1 до 4,0 (недолежана; в межах 23...27); - 3,0 і менше (солома; більше 27)

Підсумовуючи відносні значення у балах показників соломи (засміченість, вихід лубу зі стебел) і трести (вихід волокна,

засміченість, група кольору волокна) із урахуванням інших показників, згідно таблиці 1 повинен визначатися рівень їхньої якості – номер соломи або номер трести [4, 5].

Ураховуючи зазначене, з метою створення нормативної документації для контролю якості соломи та трести льону олійного необхідно здійснити розподіл балових значень соломи та трести на номери, що будуть свідчити про їх рівень якості, тобто сортність.

**Мета дослідження** – дослідити існуючі методи та обґрунтувати методологічний підхід для здійснення розподілу балових значень показників соломи та трести на номери.

### **Матеріали і методи**

Використано основи системного аналізу та принципи моделювання процесів із метою поділу показників соломи та трести льону олійного на класи (сортність), що прогнозують рівень їхньої якості та сфери застосування. Кластерний аналіз значущих показників даної сировини, та вибір найбільш об'єднаних між собою об'єктів (значень) виконано за допомогою прикладної програми Statistica.

### **Результати дослідження та обговорення**

Моделювання процедури поділу дослідних показників соломи та трести льону олійного на класи проведено базуючись на засадах системного аналізу і принципах моделювання процесів. Процес формування класів сортності соломи та трести, який полягає в обґрунтованому розподілі їхніх показників якості на номери, здійснено в чотири етапи, кожен із яких передбачає виконання певних завдань (рис. 1).

На даний час відомим є досвід поділу показників якості соломи та трести льону-довгунця на номери, який викладено в нормативно-технічній документації з визначення якості даної сировини [6 – 9]. Так, показниками якості соломи, що застосовуються для оцінювання та покладені в основу її поділу на номери, є: довжина жмені, вихід лубу, розривне навантаження, колір соломи та придатність [6, 7]. Показниками якості трести, що застосовуються для оцінювання та покладені в основу її поділу на номери, є: вихід волокна, відокремленість (ступінь вилежаності трести) та колір волокна із трести [8, 9]. Тому для формування номерів соломи та трести льону олійного за характеристиками якості потрібно використати статистичні дані про прояви цих показників (їхніх величин), що реєструються протягом тривалого часу.

Системний аналіз розпочато із формування закономірностей поділу показників соломи та трести за номерами. Для наочності використано

дерево події, як метод, що широко застосовується в системному аналізі [10]. Головною подією вважали формування номера сировини, тобто соломи чи трести (подія  $X$ ). Дана подія може проявитись у вигляді подій нижнього рівня ( $NT$ ), де  $k$  – номер соломи ( $k = 1 \dots 5$ ) або трести ( $NT$ ), де  $n$  – номер трести ( $n = 1 \dots 5$ ). Кожна з цих подій є результатом передумов верхнього рівня. Для соломи таких передумов три: вихід лубу ( $L$ ), засміченість ( $Z$ ) і група кольору соломи ( $K$ ). Для трести – чотири: вихід волокна ( $L$ ), засміченість ( $Z$ ), колір волокна із трести ( $K$ ), відокремлюваність ( $V$ ) (рис. 2).

**I етап** – змістовна постановка задачі:

– розробка комплексу смислових і знакових моделей, що дозволять нам встановити основні закономірності виникнення події – формування номера соломи та трести і кількісно оцінити міру виникнення її прояву –  $Q(\tau)$ ;

– вибір вихідних даних, а також статистичних даних згідно з їхнім станом, отриманих дослідним шляхом.

**II етап** – концептуальна постановка задачі:

– висування гіпотези відносно моделюючого явища;

– подача формування номера соломи та трести і подача цього процесу у вигляді потокового графа, який інтерпретує процес як ланцюг прояву окремих оціночних критеріїв із урахуванням ймовірностей їхньої появи.

**III етап** – перевірка та якісний аналіз семантичної моделі:

– перевірка гіпотез відносно події, що моделюється;

– якісне оцінювання потоків графа.

**IV етап** – математична постановка і вибір методу розв'язку задачі:

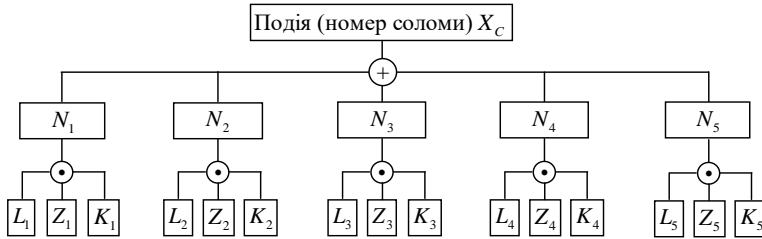
– формування системи алгебраїчних рішень та перевірка їхньої коректності;

– розробка процедури апріорного оцінювання параметрів аналітичної моделі.

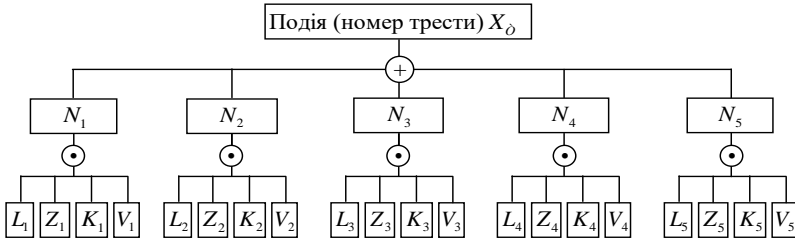
Рис. 1 – Етапи та задачі процесу формування класів сортності соломи та трести льону олійного

Наступним етапом системного аналізу та моделювання за допомогою діаграм типу “дерево” є оцінювання числових параметрів показників, що проведено з визначенням ймовірності прояву

конкретних передумов (виникнення того чи іншого критерію). Підготовчим етапом до кількісного аналізу дерева подій є формалізація, що передбачає аналітичне її подання у вигляді структурної функції.



а



б

Рис. 2 – Дерево подій:

а – формування номера соломи; б – формування номера трести

Ці функції для сформованих моделей – дерев подій (рис. 2) подано наступним чином:

$$\begin{aligned}
 X_C &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = \\
 &= (L_1 \cdot Z_1 \cdot K_1) + (L_2 \cdot Z_2 \cdot K_2) + (L_3 \cdot Z_3 \cdot K_3) + (L_4 \cdot Z_4 \cdot K_4) + (L_5 \cdot Z_5 \cdot K_5), \\
 X_T &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 = \\
 &= (L_1 \cdot Z_1 \cdot K_1 \cdot V_1) + (L_2 \cdot Z_2 \cdot K_2 \cdot V_2) + (L_3 \cdot Z_3 \cdot K_3 \cdot V_3) + (L_4 \cdot Z_4 \cdot K_4 \cdot V_4) + (L_5 \cdot Z_5 \cdot K_5 \cdot V_5). \quad (1)
 \end{aligned}$$

В якості об'єктивної міри прояву події використано ймовірність  $Q$ , що описується багаточленами:

$$\begin{aligned}
 Q_C &= P(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) = \\
 &= P(L_1 \cdot Z_1 \cdot K_1) + P(L_2 \cdot Z_2 \cdot K_2) + P(L_3 \cdot Z_3 \cdot K_3) + P(L_4 \cdot Z_4 \cdot K_4) + P(L_5 \cdot Z_5 \cdot K_5), \\
 Q_T &= P(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) = \\
 &= P(L_1 \cdot Z_1 \cdot K_1 \cdot V_1) + P(L_2 \cdot Z_2 \cdot K_2 \cdot V_2) + P(L_3 \cdot Z_3 \cdot K_3 \cdot V_3) + \\
 &\quad + P(L_4 \cdot Z_4 \cdot K_4 \cdot V_4) + P(L_5 \cdot Z_5 \cdot K_5 \cdot V_5), \quad (2)
 \end{aligned}$$

де  $P(N)$  – ймовірність прояву подій (формування відповідного номера соломи або трести);  $P(L \cdot Z \cdot K \cdot V) = P(L)P(Z)P(K)P(V)$ ;  $P(L)$  – ймовірність передумови  $L$ ;  $P(Z)$  – ймовірність передумови  $Z$ ;  $P(K)$  – ймовірність передумови  $K$ ;  $P(V)$  – ймовірність передумови  $V$ .

Отримані вирази (1) і (2) розкривають механізм формування номерів (сортності) соломи та трести льону олійного, але не розкривають механізму кількісного оцінювання. Тому сформульовано наступну задачу, що потребує вирішення: побудувати математичну модель оцінювання показників якості соломи та трести.

Метою виконання поставленого завдання є оцінювання однорідних об'єктів, а саме зразків соломи та трести. Для вирішення задачі розподілу показників якості соломи та трести використано основи багатомірного статистичного аналізу застосовуючи один із його методів – кластерний аналіз [11]. Техніка такого аналізу базується на поняттях подібності об'єктів, за умови групування спостережень та ознак. Перші дві ознаки для соломи – вихід лубу  $L$  (%) та засміченість  $Z$  (%). Для проведення процедури кластеризації показників якості соломи попередньо оцінимо щільність прояву показника засміченості за умови прийнятих меж показника виходу лубу:

$$p(Z) = \frac{p_i(Z)}{n}, \quad (3)$$

де  $p_i$  – кількість проявів  $i$ -ї величини;  $n$  – загальна кількість дослідів.

Загальну кількість дослідів приймали:  $n_1$  – для досліджуваних зразків соломи, що мають показник виходу лубу  $L = 11 \dots 12\%$ ;  $n_2$  – для зразків соломи із  $L = 13 \dots 15\%$ ;  $n_3$  – для зразків соломи із  $L = 16 \dots 18\%$ ;  $n_4$  – для зразків соломи із  $L = 19 \dots 24\%$ ;  $n_5$  – для зразків із  $L = 25 \dots 40\%$ .

Із урахуванням цього щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості визначиться:

$$p_k(Z) = \frac{p_i(Z)}{n_k}, \quad (4)$$

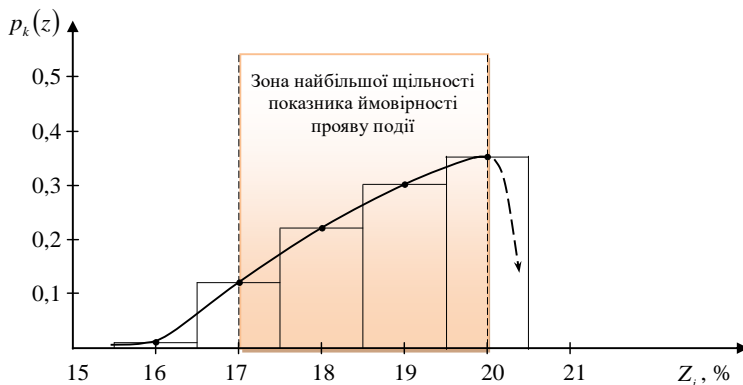
де  $k = 1 \dots 5$ .

Аналогічно, враховуючи, що перші три ознаки для трести – вихід волокна  $L$  (%), засміченість  $Z$  (%) та показник кольору волокна  $K$ , проведено оцінку щільності ймовірності їхнього прояву.

У таблицях 2 – 6 наведено результати виконаних розрахунків для соломи льону олійного, а у таблицях 7 – 16 для трести згідно показників якості, що отримані експериментальним шляхом [12]. На рис. 3 – 7 наведено графічну інтерпретацію отриманих значень щільності розподілу показників якості соломи льону олійного, а на рис. 8 – 17 – для трести.

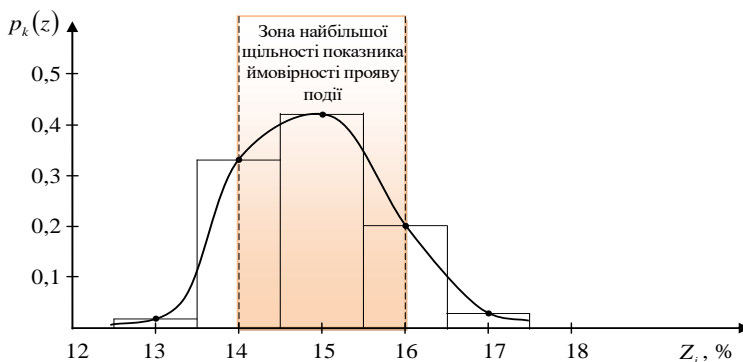
Таблиця 2 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі соломи із виходом лубу 11...12 %

№	Показник	Значення					
		20	19	18	17	16	15
1	$Z_i$						
2	$p_k(Z_i)$	0,35	0,3	0,22	0,12	0,01	0

Рис. 3 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 11...12\%$ 

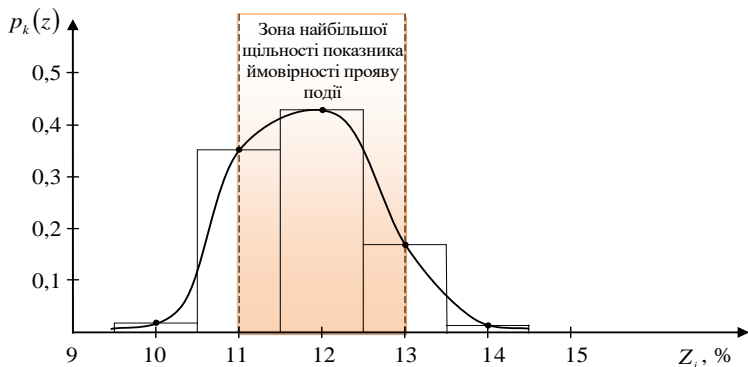
Таблиця 3 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі соломи із виходом лубу 13...15 %

№	Показник	Значення					
		17	16	15	14	13	12
1	$Z_i$						
2	$p_k(Z_i)$	0,03	0,2	0,42	0,33	0,02	0

Рис. 4 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 13...15\%$

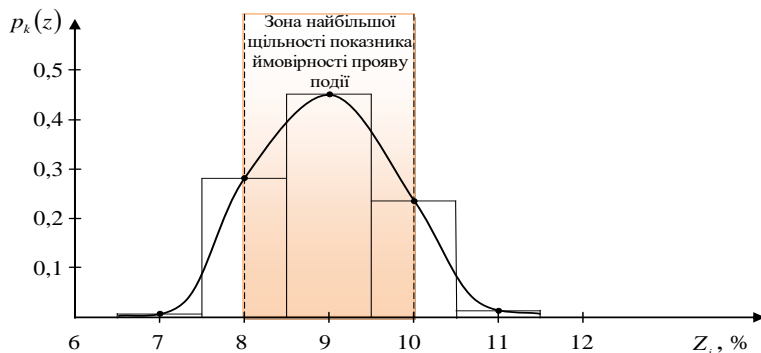
Таблиця 4 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі соломи із виходом лубу 16...18 %

№	Показник	Значення					
		14	13	12	11	10	9
1	$Z_i$						
2	$p_k(Z_i)$	0,02	0,17	0,43	0,35	0,03	0

Рис. 5 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 16...18\%$ 

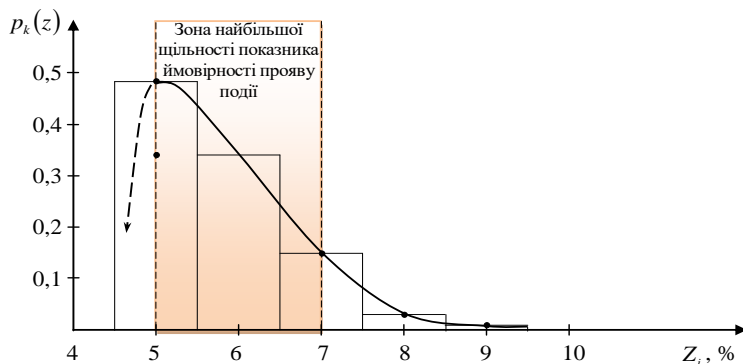
Таблиця 5 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі соломи з виходом лубу 19...24 %

№	Показник	Значення					
		11	10	9	8	7	6
1	$Z_i$						
2	$p_k(Z_i)$	0,02	0,24	0,45	0,28	0,01	0

Рис. 6 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 19...24\%$

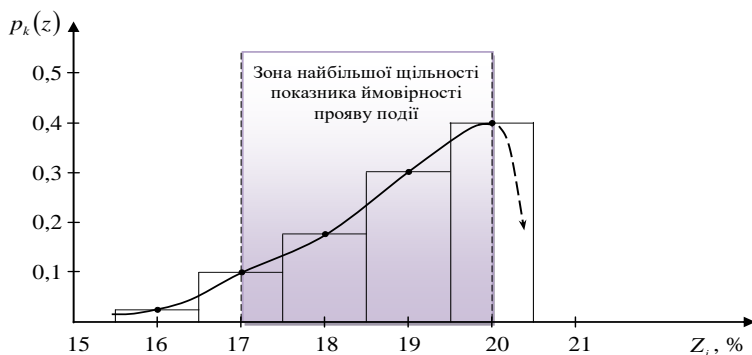
Таблиця 6 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі соломи із виходом лубу 25...40 %

№	Показник	Значення				
		9	8	7	6	5
1	$Z_i$	9	8	7	6	5
2	$p_k(Z_i)$	0,01	0,03	0,15	0,34	0,48

Рис. 7 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 5...7\%$ 

Таблиця 7 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі трести із виходом волокна 11...12 %

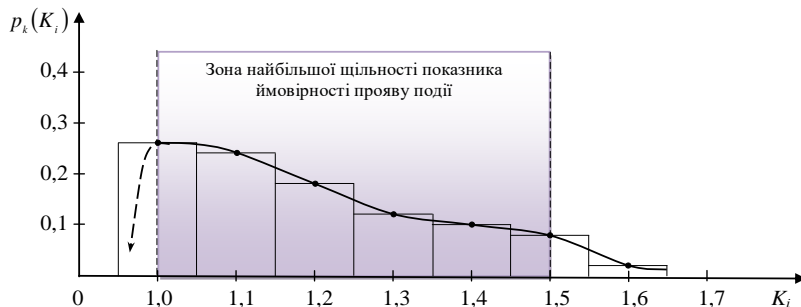
№	Показник	Значення					
		20	19	18	17	16	15
1	$Z_i$	20	19	18	17	16	15
2	$p_k(Z_i)$	0,4	0,3	0,175	0,1	0,025	0

Рис. 8 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 11...12\%$



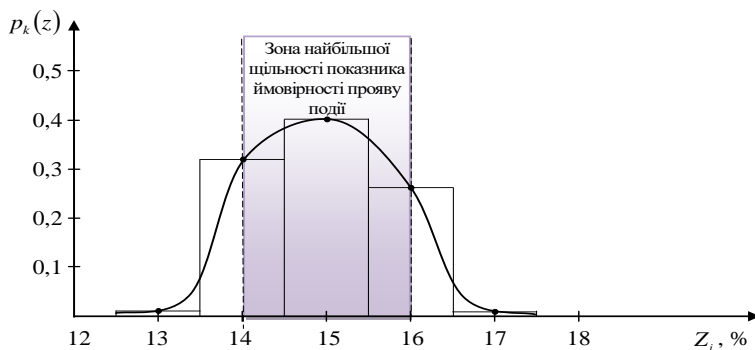
Таблиця 8 – Щільність розподілу ймовірності показника кольору волокна в групі трести із виходом волокна 11...12 %

№	Показник	Значення							
1	$K_i$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
2	$p_k(K_i)$	0,26	0,24	0,18	0,12	0,1	0,08	0,02	0

Рис. 9 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника кольору волокна  $K_i$  для  $L = 11...12\%$ 

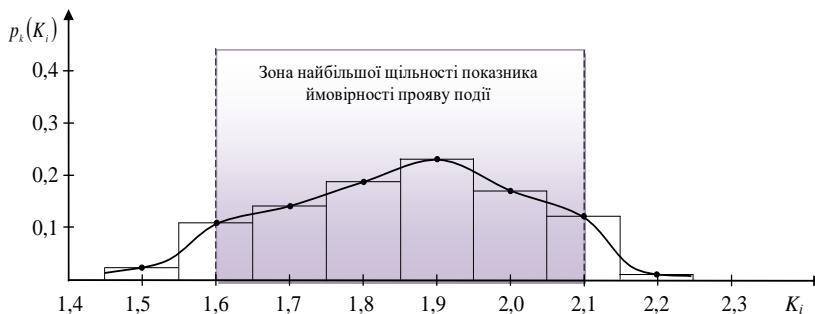
Таблиця 9 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі трести із виходом волокна 13...15 %

№	Показник	Значення					
1	$Z_i$	17	16	15	14	13	12
2	$p_k(Z_i)$	0,01	0,26	0,4	0,32	0,01	0

Рис. 10 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 13...15\%$

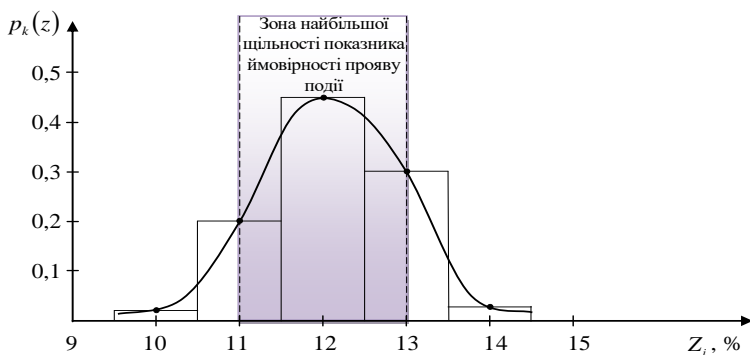
Таблиця 10 – Щільність розподілу ймовірності показника кольору волокна в групі трести із виходом волокна 13...15 %

№	Показник	Значення								
		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
1	$K_i$									
2	$p_k(K_i)$	0,03	0,11	0,14	0,19	0,23	0,17	0,12	0,01	0

Рис. 11 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника кольору волокна  $K_i$  для  $L = 13...15\%$ 

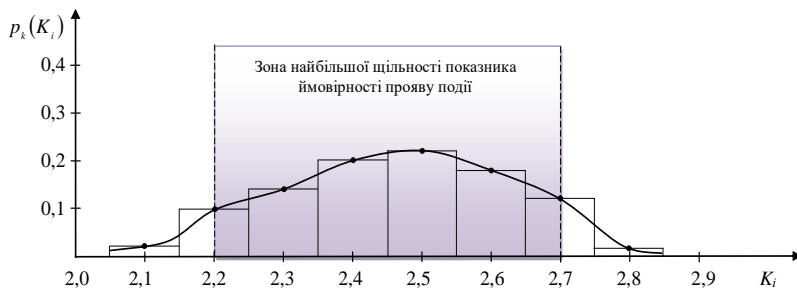
Таблиця 11 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі трести із виходом волокна 16...18 %

№	Показник	Значення						
		14	13	12	11	10	9	
1	$Z_i$							
2	$p_k(Z_i)$	0,03	0,3	0,45	0,2	0,02	0	

Рис. 12 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 16...18\%$

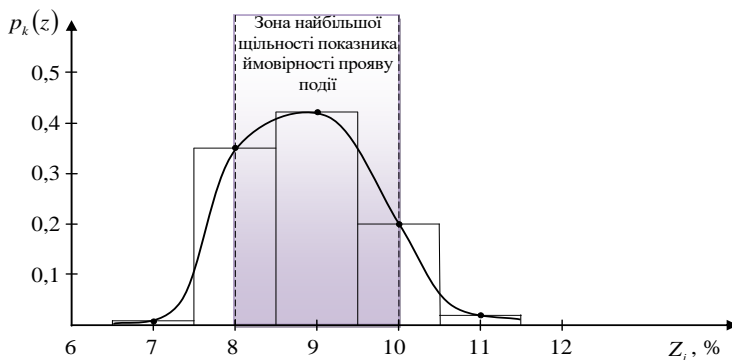
Таблиця 12 – Щільність розподілу ймовірності показника кольору волокна в групі трести із виходом волокна 16...18 %

№	Показник	Значення									
1	$K_i$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	
2	$p_k(K_i)$	0,02	0,1	0,14	0,2	0,22	0,18	0,12	0,02	0	

Рис. 13 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника кольору волокна  $K_i$  для  $L = 16...18\%$ 

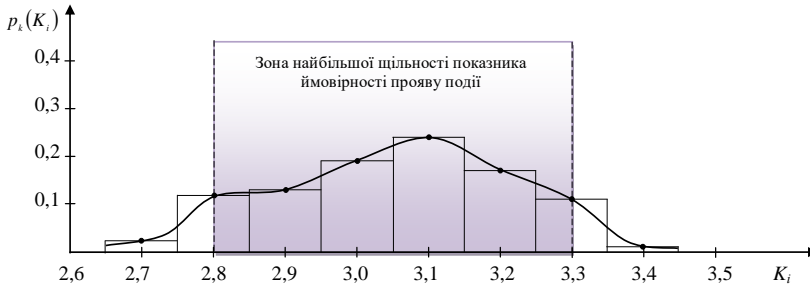
Таблиця 13 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі трести із виходом волокна 19...20 %

№	Показник	Значення					
1	$Z_i$	11	10	9	8	7	6
2	$p_k(Z_i)$	0,02	0,2	0,42	0,35	0,01	0

Рис. 14 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 19...24\%$

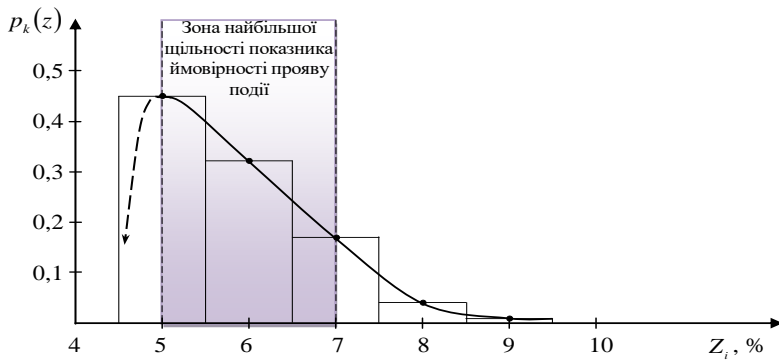
Таблиця 14 – Щільність розподілу ймовірності показника кольору волокна в групі трести із виходом волокна 19...20 %

№	Показник	Значення									
		2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	
1	$K_i$	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	
2	$p_k(K_i)$	0,03	0,12	0,13	0,19	0,24	0,17	0,11	0,01	0	

Рис. 15 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника кольору волокна  $K_i$  для  $L = 19...24\%$ 

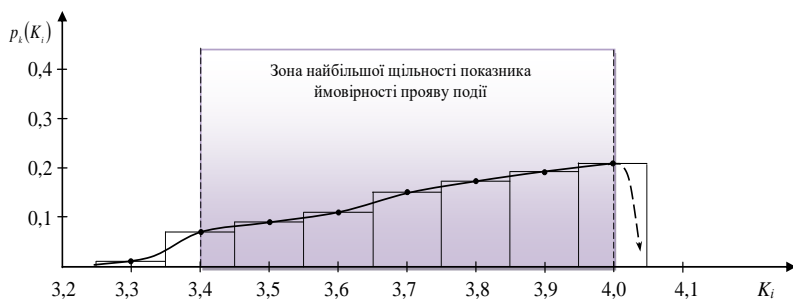
Таблиця 15 – Щільність розподілу ймовірності показника засміченості в групі трести із виходом волокна 25...40 %

№	Показник	Значення				
		9	8	7	6	5
1	$Z_i$	9	8	7	6	5
2	$p_k(Z_i)$	0	0,05	0,18	0,32	0,45

Рис. 16 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника засміченості  $Z_i$  для  $L = 25...40\%$

Таблиця 16 – Щільність розподілу ймовірності показника кольору волокна в групі трести із виходом волокна 25...40 %

№	Показник	Значення								
		3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
1	$K_i$	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
2	$p_k(K_i)$	0	0,01	0,07	0,09	0,11	0,15	0,17	0,19	0,21

Рис. 17 – Щільність розподілу ймовірності прояву показника кольору волокна  $K_i$  для  $L = 25...40\%$ 

Аналіз отриманих гістограм дозволив встановити зв'язок між показниками та встановити межі відповідності саме тих, що відповідають зонам найбільшої їхньої щільності. Із використанням встановлених зв'язків проведено дослідження, що спрямовані на обґрунтування поділу показників якості соломи та трести льону олійного на номери.

Розподіл показників якості соломи та трести льону олійного за номерами (кластерами) будемо проводити із використанням графів-дендрограм. Як відомо із літературних джерел [11], формувати кластери можна за ієрархічною або агломеративною процедурою. У нашому випадку використано агломеративну процедуру кластеризації. Із цією метою розглянуто первинну сукупність даних  $n$ , що отримана під час проведення експериментальних досліджень.

Принцип роботи агломеративної процедури полягає в послідовному об'єднанні в кластер спочатку двох найближчих, а потім більш віддалених один від одного об'єктів. Інформаційною базою кластерного аналізу є матриця відстаней розміром  $n \times n$ . На кожному кроці об'єднання найближчими є ті об'єкти між якими відстань  $d_{ij}$  є мінімальною. Відстань між об'єктами визначено з використанням евклідової відстані:

$$d_{ij}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x_{ij} - x_{ji})^2}, \quad (5)$$

де  $x_{ji}$  – величина  $i$ -ї компоненти  $j$ -го об'єкта;  $k$  – число змінних;  $i, j$  – об'єкти, що досліджуються.

Відстані між об'єктами розраховано за формулою (5) та представлено у вигляді матриці відстаней:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Послідовність об'єднання кластерів подано візуально у вигляді деревовидної діаграми-дендрограми. На одній осі дендрограми представлені об'єкти, на другій – відстані, за якими відбувається об'єднання (рис. 18).

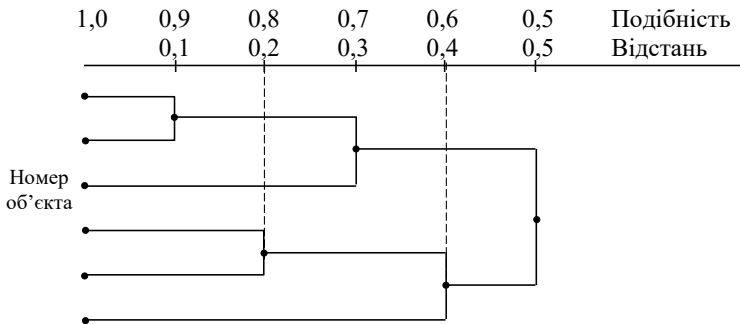


Рис. 18 – Приклад дендрограми

На рис. 18 представлено приклад дендрограми, що відповідає шести об'єктам, де найбільш близькими є об'єкти 1 і 3, тому вони об'єднані в один кластер на рівні подібності (близькості) 0,9, а об'єкти 4 і 5 об'єднані на рівні 0,8. На цьому кроці є чотири кластери: (1, 3), (6), (5, 4), (2). На третьому і четвертому кроках процесу утворюються кластери (1, 3, 6) і (5, 4, 2), які відповідають рівню близькості, що дорівнює 0,7 і 0,6. У результаті всі об'єкти групуються в один кластер на рівні 0,5. Загальну схему агломеративної кластер-процедури можна подати як повторення трьох операцій:

- 1) пошук мінімальної відстані між  $i$  та  $j$ ;

2) об'єднання  $i$  та  $j$  в один кластер та надання останньому спільного індексу  $q$ ;

3) розрахунок відстаней від сформованого кластера  $d(q,s)$  за формулою:

$$\left. \begin{array}{l} d(q,s) = a; \\ 1. d(j,s) + a; \\ 2. d(k,s) + a; \\ 3. d(j,k) + a; \\ 4. [d(j,s) - d(k,s)] \cdot d(q,s) = a; \\ \vdots \\ 1. a; \\ 2. a; \\ 3. a. \end{array} \right\} \quad (7)$$

Геометрична інтерпретація кластер-процедури подана на рис. 19.

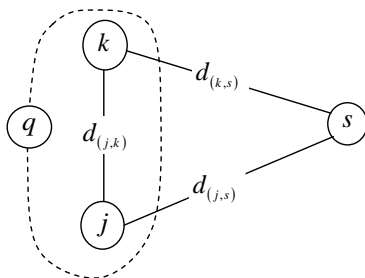


Рис. 19 – Геометрична інтерпретація кластер-процедури

Кластерний аналіз значущих показників якості соломи і трести льону олійного, що отримані експериментальним шляхом, та вибір найбільш об'єднаних між собою об'єктів (значень) виконано за допомогою прикладної програми “Statistica”. На основі одержаних результатів було побудовано дендрограми розподілу показників якості соломи та трести на кластери.

На рис. 20 представлено результати кластеризації соломи льону олійного за показниками засміченості та виходу лубу, а на рис. 21 – результати кластеризації трести льону олійного за показниками засміченості, виходу волокна та кольору волокна. Послідовність агломерації соломи та трести льону олійного простежується на графіках, що представлені відповідно на рис. 22 – 23.

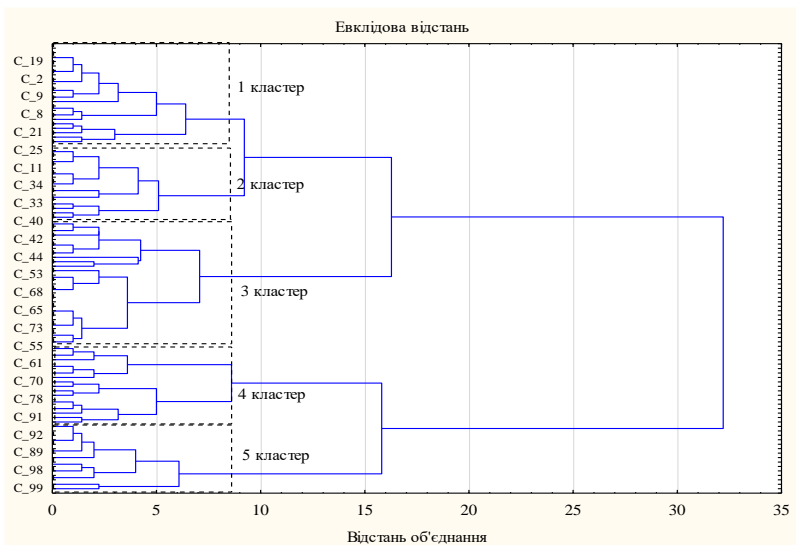


Рис. 20 – Дендрограма розподілу показників якості соломи льону олійного на кластери

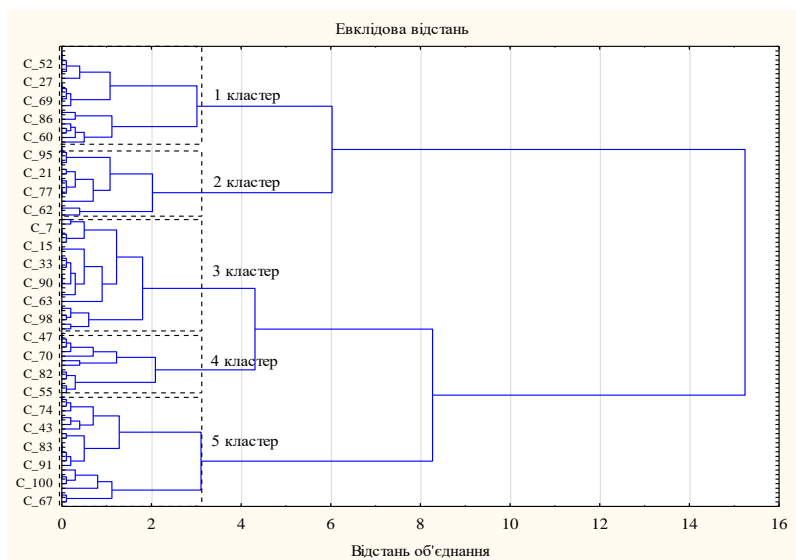


Рис. 21 – Дендрограма розподілу показників якості трести льону олійного на кластери



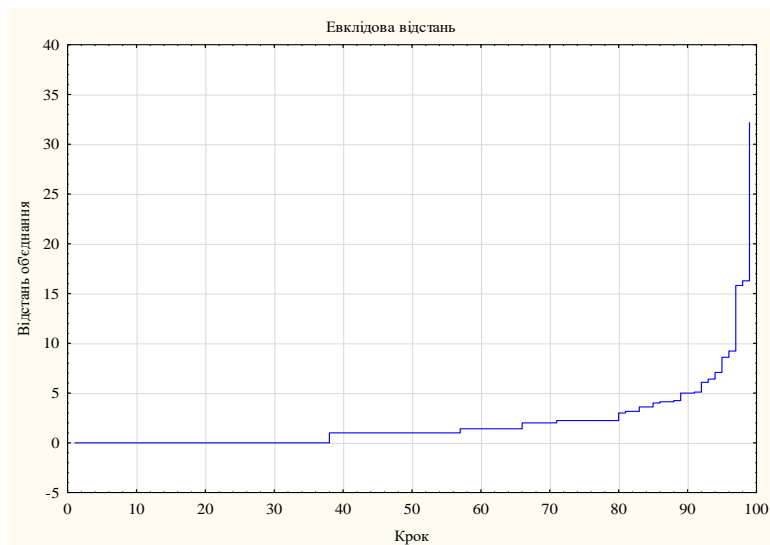


Рис. 22 – Послідовність агрегації соломи льону олійного за показниками засміченості та виходу лубу

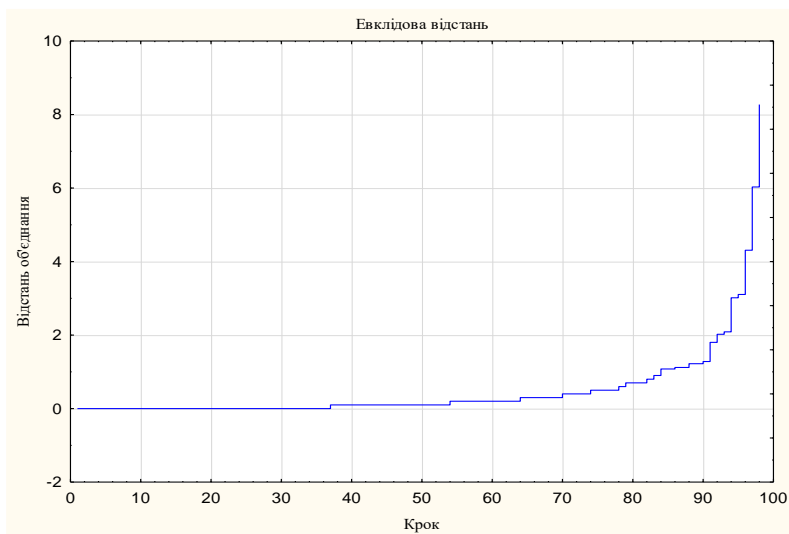


Рис. 23 – Послідовність агрегації трести льону олійного за показниками засміченості, виходу лубу та кольору волокна

Аналіз рис. 22 – 23 свідчить, що мінімальна міжкластерна відстань починає стрімко зростати на 95-му (для соломи) та на 94-му кроці (для трести). Дана зміна  $\min d(j,k)$  розглядається як сигнал того, що об'єднуються віддалені один від одного об'єкти. Очевидно, що на таких кроках варто зупинити процедуру об'єднання та виконати аналіз отриманих результатів.

Дендрограма (рис. 20) і графік агломерації соломи за показниками засміченості та виходу лубу (рис. 22), а також дендрограма (рис. 21) і графік агломерації трести за показниками засміченості, виходу волокна та кольору волокна (рис. 23) підтверджують доцільність поділу даної луб'яної сировини з льону олійного на п'ять кластерів, тобто номерів.

### Висновки

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень побудовано дендрограми розподілу показників якості і значень соломи та трести льону олійного на кластери. За отриманими даними було проведено кластеризацію показників якості даної луб'яної сировини для вибору найбільш об'єднаних між собою об'єктів.

На підставі кластерного аналізу вперше запропоновано визначати номер як соломи, так і трести льону олійного за п'ятьма рівнями якості: 5, 4, 3, 2, 1, що раціоналізує технології переробки стебел льону олійного та напрями використання готової продукції. Так, солома або треста №5 характеризується найкращими значеннями показників якості, а сировина №1 – найгіршими. Для п'яти номерів соломи встановлено граничні суми балів за трьома групами кольору: солома I групи 5 номера має кількість балів від 200 до 132, 4 – 131...98, 3 – 97...79, 2 – 78...64, 1 – 63...53; солома II групи 5 номера не має, 4 – 200...110, 3 – 109...82, 2 – 81...65, 1 – 64...53; солома III групи 5 і 4 номера не має, 3 – 200...90, 2 – 89...66, 1 – 65...53. Для п'яти номерів трести встановлено граничні суми балів за трьома групами ступеня вилежаності трести (відокремлюваності): треста вилежана (4,1 і більше) 5 номера має кількість балів від 300 до 217, 4 – 216...168, 3 – 167...134, 2 – 133...104, 1 – 103...78; треста недолежана (від 3,1 до 4,0) 5 номера не має, 4 – 300...190, 3 – 189...142, 2 – 141...109, 1 – 108...78; солома (3,0 та менше) 5 і 4 номера не має, 3 – 300...165, 2 – 164...116, 1 – 115...78.

Одержані науково обґрунтовані результати досліджень були покладені в основу нормативної документації для визначення якості соломи та трести льону олійного. Розроблені технічні умови рекомендовано використовувати у виробничій та науковій сферах під час оцінювання якості стебел льону олійного і продукції на їх основі.

Це дає можливість створювати нові ринки дешевої сертифікованої сировини в Україні, а сільгоспвиробникам правильно визначати вартість стебел соломки і трести під час її реалізації на льонозаводи.

### Список посилань

1. Головенко, Т. Н. Анализ состояния легкой промышленности Украины / Т. Н. Головенко, А. А. Тихосова, О. Ф. Богданова, А. В. Шовкомуд / Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности : науч. период. журнал Ивановской государственной политехнической академии. – 2018. – №5. – С. 251–254.
2. Головенко, Т. Н. Промышленное использование соломы льна масличного, как в мире, так и в Украине / Т. Н. Головенко, Г. А. Бойко, А. С. Дягилев, А. В. Шовкомуд // Молодий вчений : зб. наук. праць. – 2017. – №1 (41). – С. 37–40.
3. Holovenko, T. High technologies of mechanical processing of oilseed flax straw and quality of received fibers / L. Chursina, H. Tikhosova, O. Kniaziev, O. Shovkomud, T. Yanyuk / INMATEH – Agricultural Engineering. – INMA Bucharest (Romania), 2019. – Vol. 57(1). – P. 207–214.
4. Holovenko, T. N. Promising methods and systems of quality control of innovative bast raw material / T. N. Holovenko, T. I. Yanyuk, G. A. Boyko, A. S. Dyagilev, A. V. Shovkomud // Science and innovation : academic and research journal NAS Ukraine. – Kyiv, 2019. – Vol. 15(3). – P. 91–104.
5. Holovenko, T. Innovative methodology and software for quality control of new bast raw material with oilseed flax / T. Holovenko, V. Kozel, O. Shovkomud, V. Puts, L. Nazarchuk // Vlákna a textil : scientific journal of Institute of Natural and Synthetic Polymers of Slovak University of Technology. – Bratislava (Slovakia), 2019. – Vol. 26(2). – P. 18–24.
6. ГОСТ 28285-89. Солома льняная. Требования при заготовках.
7. ГОСТ 14897-69. Солома льняная. Технические условия.
8. ГОСТ 24383-89. Треста льняная. Требования при заготовках.
9. ДСТУ 4149:2003. Треста лляна. Технічні умови.
10. Хомяков, Д. М. Основы системного анализа / Д. М. Хомяков, П. М. Хомяков. – М. : Изд-во МГТУ, 1996. – 108 с.
11. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – М. : Статистика, 1977. – 128 с.
12. Головенко, Т. М. Загальна характеристика показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів / Т. М. Головенко, Г. А. Бойко, О. О. Іваненко, О. В. Шовкомуд // Молодий вчений : зб. наук. праць. – 2016. – №5 (32). – С. 218–222.

**WARNING RESISTANCE OF CULTIVATOR PAWS MODIFIED BY NITROGENATION IN GLOW DISCHARGE**

**M. Stechyshyn, M. Luk'yanyuk, V. Oleksandrenko,  
A. Martynyuk, Yu. Bilyuk**

Khmelnytsky National University, Khmelnytskyi, Ukraine

**ABSTRACT**

*To increase the wear resistance of the tillage tool-paws of the Tiger-Mate 200 cultivator, the technology of anhydrous nitriding in the glow discharge (BATR) of the paws has been developed. As a result of the analysis of the obtained dependences for further research to strengthen the working surface of the cultivator paws, the modification process was carried out in a mode that provides high enough plastic properties of the modified layer to eliminate chipping and chipping of the cultivator paws and blunting during operation, layer: medium – 25% N<sub>2</sub> + 75% Ar; nitriding temperature – 520°C; pressure in the discharge chamber – 200 Pa; duration of nitriding – 6 hours. As a result of applying this method of modification, a surface layer with a thickness of 120...150 μm with a microhardness of H100 950...980 MPa based on an elastic base (hardened steel 35G after low-temperature tempering obtained in the process of nitriding H100 500...600 MPa) was obtained. Unmodified and modified paws were installed and tested on the cultivator of the Tiger-Mate 200 model in production conditions in the fields of STzOV “Garant” (Khmelnytsky region, Ukraine). In the course of tests change of the sizes of paws in process of their attrition was fixed. The test results confirmed the increase in wear resistance of the modified paws in comparison with the unmodified ones by 1.7 ... 1.8 times.*

**Key words:**

cultivator paws,  
anhydrous nitriding in a  
glow discharge (BATR),  
wear resistance,  
dry friction,  
work bodies

**Article history:**

Received 27.04.2020

Accepted 27.05.2020

**Corresponding author:**

m-mezon@ukr.net

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.304>

УДК 631.171

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЛАП КУЛЬТИВАТОРА, ЩО МОДИФІКОВАНІ АЗОТУВАННЯМ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ****М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.П. Олександренко,  
А.В. Мартинюк, Ю.М. Білик**

Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

*Для підвищення зносостійкості ґрунтообробних робочих органів розроблена технологія безводневого азотування у тліючому розряді (БАТР) лап культиватора (Tiger-Mate 200). Під час дослідження зміцнення робочої поверхні лап культиватора процес модифікації здійснювався за режимом, що забезпечує достатньо високі пластичні властивості модифікованого шару, щоб виключити сколювання та викривлення ріжучого леза лапи культиватора і її затуплення в процесі роботи, з одночасним забезпеченням достатньої глибини азотованого шару: середовище – 25% N<sub>2</sub> + 75% Ar; температура азотування – 520°C; тиск у розрядній камері – 200 Па; тривалість азотування – 6 год. У результаті застосування цього способу модифікації отримано поверхневий шар товщиною 120...150 мкм із мікротвердістю H<sub>100</sub> 950...980 МПа, що опирається на пружну основу (гартовану сталь 35Г після низькотемпературного відпуску, отриманого в процесі азотування H<sub>100</sub> 500...600 МПа). Немодифіковані і модифіковані лапи були встановлені та випробовувалися на культиваторі моделі Tiger-Mate 200 у виробничих умовах на полях підприємства СТЗОВ “Гарант” (Хмельницька область, Україна). У процесі випробування фіксувалася зміна розмірів лап (стирання). Результати випробування підтвердили підвищення зносостійкості модифікованих лап у порівнянні із немодифікованими в 1,7...1,8 рази.*

**Ключові слова:** лапи культиватора, безводневе азотування у тліючому розряді (БАТР), зносостійкість, сухе тертя, ґрунтообробні робочі органи.

**Стан питання та постановка проблеми**

Для отримання високих урожаїв сільськогосподарської продукції необхідна якісна обробка ґрунту. Для обробки ґрунту застосовуються різноманітні ґрунтообробні машини, зокрема культиватори. Робочим органом (РО) культиватора є лапи, які внаслідок взаємодії із ґрунтом піддаються інтенсивному зношуванню.

На сьогодні існує велика кількість методів підвищення довговічності ґрунтообробних РО, що передбачають використання різних технологічних підходів і методів їх зміцнення залежно від особливостей ґрунтів, умов та режимів роботи культиваторів тощо. Вирішенню проблеми підвищення зносостійкості РО ґрунтообробних машин присвячена значна кількість наукових праць [1 – 5], які вказують на наявність різних підходів до її вирішення. Так, у роботі [2] розрізняють конструктивні, експлуатаційні та технологічні способи підвищення зносостійкості РО ґрунтообробних машин. До технологічних способів відноситься, насамперед, підбір матеріалів і термообробки, які забезпечують високу зносостійкість в умовах абразивного зношування [1 – 4]. У науковій праці [3] для виготовлення деталей, що працюють в абразивній масі, рекомендовано використовувати матеріали: марганцеві сталі (30Г, 50Г, 65Г, 110Г6Х3Л), сталі леговані хромом (38ХА, 40Х, 45Х, Х12, Х12Ф1, Х6ВФ), багатокомпонентні леговані сталі і сплави (12ХН3А, 17ХГ2СФР, 08Х18Н10Т), тверді спечені сплави (ВК6, ВК8, ВК15, ВК20). У праці також відзначається можливість використання двошарового або трьохшарового прокату для підвищення зносостійкості. Поверхнєве зміцнення застосовують для підвищення зносостійкості у випадку, якщо до об'ємної міцності деталей не висуваються підвищені вимоги, але необхідна висока поверхнева міцність деталей. Для РО машин, що працюють в абразивній масі, використовують наплавлення таких видів: ручне газове прутковим сплавом типу сормайт №1; дугове порошковою стрічкою; багатоелектродне електрошлакове; плазмове; індукційне. У сільськогосподарському машинобудуванні 90% усіх робіт зі зміцнення – індукційне наплавлення. Основним недоліком такого методу є висока вартість сплавів для наплавлення [2].

Лапи культиваторів є однією із найбільш масових деталей РО сільськогосподарських машин. Оскільки лапи культиваторів мають короткий термін служби, відповідно, існує значна потреба у них у вигляді запасних частин, що, у свою чергу, зумовлює необхідність у значній кількості якісного металу для їх виготовлення. Відповідно до технічних вимог, гарантійне напрацювання стрілчастих лап культиватора повинно бути не меншим за 25 га, але, як показує практика експлуатації таких РО, їх напрацювання на відмову на різних ґрунтах не перевищує 14...19 га. Типовий характер спрацювання лап культиваторів показано на рис. 1.

В Україні серійні РО ґрунтообробних машин виготовляються зі сталей 65Г, 45 і ЛІ53, які в загартованому стані (твердість 37...43HRC)

мають задовільні показники відносного видовження, але невелику межу міцності ( $\sigma_6 = 880 \dots 1080$  МПа). За даними багаторічних досліджень і аналізу результатів експлуатаційних випробувань РО ґрунтообробних машин, лише за перший рік експлуатації із причини зламу (або деформації з наступним зломом) виходять із ладу близько 40% лемешів і 15% полиць, 20% лап культиваторів і 30% різних типів дискових робочих органів [1].

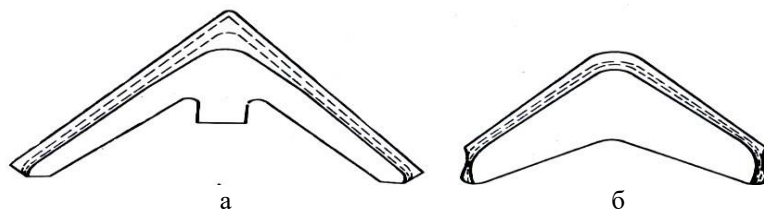


Рис. 1 – Спрацювання контуру лап культиватора [1]:  
а – із захватом 270 мм; б – із захватом 150 мм

У роботі [5] висловлено припущення, що основна причина виходу із ладу РО ґрунтообробних машин є недостатня втомна витривалість металів або сплавів РО. Очевидно, що таке припущення має місце для композиційних матеріалів із кераміко-металевими покриттями дискретно-перемінного складу, які характеризуються високим рівнем напружено-деформованого стану і електрохімічною гетерогенністю зміцненої поверхні [6]. Разом із тим, експлуатаційне випробування таких лап показало, що їх довговічність в 1,45 разів вища від серійних і гарантовано забезпечує напрацювання до 32 га.

Дослідження представлені в роботі [1] показали, що на лапах з індукційним загартуванням зношування за один сезон роботи досягає 30 мм, при цьому кут їх заточування змінюється з  $15^\circ$  до  $136^\circ$  і вони не зрізують, а зминають бур'яни. Крім того, в цьому випадку зростають зусилля на тяговий агрегат, що призводить до підвищення зношування його вузлів і механізмів та зростання витрат паливно-мастильних матеріалів.

Дослідження [7] показує, що застосування для зміцнення лап лазерної термообробки дозволяє в 1,3...1,4 рази знизити зношування деталей різальних елементів у порівнянні з об'ємним гартуванням, а застосування лазерного наплавлення сплаву ПС – 14-60 + 6% В<sub>4</sub>С в 1,7...1,8 рази у порівнянні із базовою технологією індукційного наплавлення. Лазерні технології забезпечують локальне нагрівання за відсутності або мінімальних деформацій при наступному охолодженні

зміцнених виробів. Отримання високих фізико-механічних властивостей поверхневих шарів пов'язано із високою швидкістю нагрівання та охолодження, що становить  $10^4 \dots 10^6$  °C/с.

Загалом, можна констатувати, що для більшості регіонів України одного комплексу деталей РО ґрунтообробних машин недостатньо на поточний річний цикл (весна + осінь), а тому потрібно продовжувати пошуки нових, економічно обґрунтованих методів і способів поверхневого зміцнення РО ґрунтообробних машин.

**Мета дослідження** – пошук способів і методів підвищення зносостійкості РО ґрунтообробних машин шляхом застосування прогресивних технологій поверхневого зміцнення, а саме безводного азотування у тліючому розряді (БАТР).

### Матеріали і методи

Дослідження процесу БАТР проводилося в лабораторії Подільського наукового фізико-технологічного центру (ПНФТЦ) в Хмельницькому національному університеті (ХНУ) на експериментальній установці ИПАС-63, яка забезпечує зміцнення як зразків, так і промислових деталей діаметром до 400 мм і довжиною до 1000 мм (рис. 2).

Кожен режим азотування складався із циклу операцій: підготовчі операції до зміцнення (очистка камери і деталей від іржі, окалини, знежирення поверхонь) та проведення процесу зміцнення (створення вакууму в камері  $10^{-2}$  мм рт. ст., продувка камери робочою сумішшю, відкачування суміші, очищення деталей за напруги 1200 В, запуск робочої суміші, проведення основного режиму за встановлених значень тиску і температури).



Рис. 2 – Установки азотування у тліючому розряді ИПАС-63 (варіант двокамерної установки)



На Шепетівському культиваторному заводі (Україна) лапи культиваторів виготовляються із високовуглецевої сталі (65Г, ГОСТ1050-88, що відповідає ДСТУ 7809:2015). Нами досліджувалися ножі культиватора Tiger-Mate 200 закордонного виробництва із метою підвищення їх зносостійкості. Лабораторним аналізом було встановлено, що ножі виготовлені із матеріалу, який відповідає вітчизняній марці легованої сталі 35Г.

Дослідження проводилися у два етапи: на першому етапі випробування на зносостійкість проводили на зразках, виготовлених із матеріалу відпрацьованих лап, а на другому етапі – на натурних зразках у виробничих умовах. Зносостійкість визначали на універсальній машині тертя 2168 УМТ у режимі сухого тертя із закріпленням абразивом. Форма та розміри дослідного зразка представлені на рис. 3. Режим сухого тертя застосовувався із метою інтенсифікації процесу зношування зразків та зменшення часу проведення випробувань.

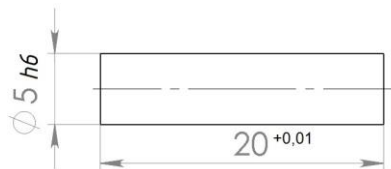


Рис. 3 – Ескіз зразка для проведення досліджень на зносостійкість

Дослідження проводили із використанням металографічного, електронно-мікроскопічного методів, методу феромагнітного резонансу та рентгеноструктурного аналізу [8]. Структуру дифузійного шару в перерізі і розподіл мікротвердості за товщиною шару вивчали на травлених шліфах. Субмікроскопічну структуру нітридної зони вивчали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-200. Рентгеноструктурний фазовий аналіз поверхневих шарів зразків здійснювали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-200 із використанням  $k\alpha$  випромінювання. Товщина карбозотованого шару визначалась металографічним методом за допомогою мікроскопа МІМ-10 та шляхом вимірювання мікротвердості за глибиною зміцненого зразка.

### Результати дослідження та обговорення

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що незалежно від складу газової атмосфери в поверхневому шарі утворюється  $\varepsilon$ -фаза ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ),  $\gamma$ -фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) і  $\alpha$ -фаза. Фазовий склад і співвідношення

фазових структур в азотованому шарі можна регулювати шляхом зміни режимних параметрів азотування: температури  $T$ , вмісту азоту  $C$  і тиску газової суміші  $P$  (рис. 4). Аналіз отриманих залежностей показує, що найбільш суттєво впливає на кількість утворення тих чи інших фаз температура  $T$  процесу іонного азотування. Так, із її підвищенням, зменшується кількість  $\varepsilon$ -фази (рис. 4, а) в поверхневому шарі і одночасно збільшується кількість  $\gamma'$ -фази і  $\alpha$ -фази (рис. 4, б, в). Із збільшенням вмісту  $C$  азоту і тиску  $P$  газової суміші збільшується кількість  $\varepsilon$ -фази (рис. 4, а) і зменшується кількість  $\gamma'$ -фази (рис. 4, б). При цьому вміст  $C$  азоту і тиск  $P$  газової суміші практично не впливають на вміст  $\alpha$ -фази (рис. 4, в), кількість якої контролюється лише температурою  $T$  іонного азотування у тліючому розряді, яка, у свою чергу, залежить від енергетичних характеристик процесу (густини струму і напруги на електродах газорозрядної камери)

Ураховуючи суттєву різницю між фізико-хімічними властивостями фазових структурних складових азотованого шару і можливість регулювання їх кількості та співвідношення між ними, з'являються широкі можливості отримання шарів із заданими характеристиками поверхонь.

Як показали дослідження [8 – 13], структура шару і його фазовий склад визначають експлуатаційні характеристики виробів. Зокрема, для відкритих пар тертя (зубчасті колеса, зірочки ланцюгових передач, пальці конвеєрів тощо) застосовуються деталі із високою твердістю, сформовані на базі  $\varepsilon$ -фази ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ). Для закритих пар тертя (підшипники ковзання, зубчасті колеса, коробки передач тощо) необхідне формування азотованого шару із розвинутою нітридною зоною, яка складається із малоазотистих пластичних нітридних фаз  $\gamma$  і  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_3\text{N}$  і  $\text{Fe}_4\text{N}$ ), які добре приробляються та локалізують пластичні деформації і перешкоджають розвитку процесу руйнування деталі.

Найбільший вплив на підвищення границі витривалості за знакозмінних навантажень має зона внутрішнього азотування ( $\alpha$ -фаза). На підвищення жароміцності найбільший вплив також має зона внутрішнього азотування, але 2-го роду, тобто коли утворюються нітриди легуючих елементів  $\text{TiN}$ ,  $\text{ZrN}$  і  $\text{HfN}$  [3].

Вакуумно-дифузійні процеси іонного азотування у тліючому розряді протікають в 1,5...2 рази інтенсивніше, ніж за пічного азотування, що і визначає нові властивості іонно-азотованих шарів [9, 10]. Згідно [11, 12] через 4 год. настає рівновага між розпилюванням і осадженням іонів азоту, а тому основні дослідження властивостей азотованих поверхонь були проведені за тривалості процесу азотування 4 год.

Ураховуючи, що мікротвердість є важливою характеристикою зносостійкості за абразивного зношування і зміна мікротвердості за товщиною дифузійного шару характеризує співвідношення та розподіл структурних і фазових складових покриття, а також є мірою енергоємності поверхневих шарів [8], тому досліджено вплив параметрів іонного азотування на зміну мікротвердості (рис. 5, а, б).

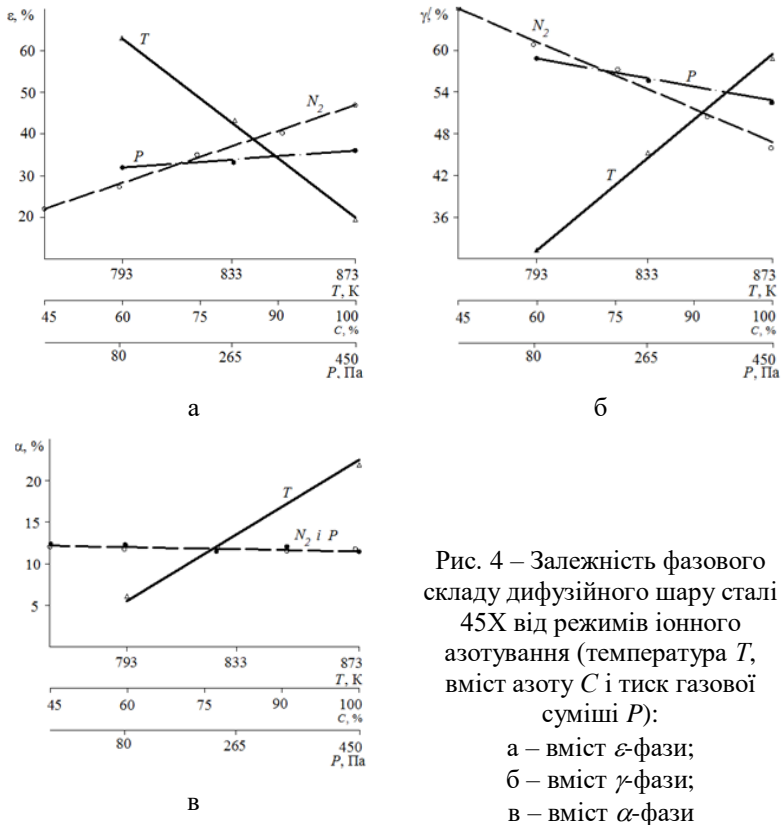


Рис. 4 – Залежність фазового складу дифузійного шару сталі 45X від режимів іонного азотування (температура  $T$ , вміст азоту  $C$  і тиск газової суміші  $P$ ):

- а – вміст  $\epsilon$ -фази;
- б – вміст  $\gamma$ -фази;
- в – вміст  $\alpha$ -фази

Аналіз отриманих результатів досліджень дозволив сформулювати загальні закономірності зміни мікротвердості нітридної зони залежно від зміни параметрів режиму азотування:

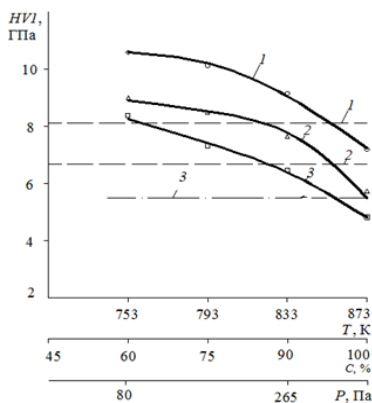
1) максимальна твердість підвищується із підвищенням вмісту вуглецю і кількості та виду легуючих елементів основи (криві 1, 2, 3 на рис. 5, а); наявність легуючих, особливо нітридоутворюючих елементів

має набагато більший вплив на величину мікротвердості, ніж вуглець (криві 1, 2, 3 на рис. 5, а);

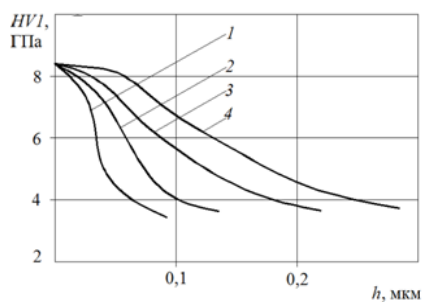
2) із підвищенням температури азотування мікротвердість нітридної зони знижується, причому швидкість зниження мікротвердості підвищується із збільшенням ступеня легування і із вмістом вуглецю основи;

3) із збільшенням вмісту азоту і тиску газового середовища мікротвердість зростає, але швидкість зростання набагато менша за швидкість її зниження при підвищенні температури;

4) збільшення часу азотування (за незмінних температури, тиску і складу газової суміші) без зміни величини мікротвердості сприяє більш плавному її переходу до твердості основи з одночасним розширенням зони дії підвищених значень мікротвердості (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5 – Графічні залежності:

а – мікротвердості нітридної зони від параметрів: температури  $T$ , К (суцільні лінії); вмісту азоту  $C$ , % (штрихові лінії); тиску газової суміші  $P$ , Па (штрих-пунктирні лінії) для сталей:

1 – 38ХМЮА; 2 – сталь 40Х; 3 – сталь 35Г;

б – розподіл мікротвердості  $HVI$  за товщиною дифузійного азотованого шару зразків сталі 40Х протягом:

1 – 1 год.; 2 – 2 год.; 3 – 3 год.; 4 – 4 год.

Максимальна мікротвердість нітридної зони отримана на сталі 38ХМЮА внаслідок того, що нітриди легуючих елементів мають вищу твердість, дисперсність, термічну стійкість порівняно із нітридами заліза, а зниження мікротвердості із підвищенням температури

азотування пояснюється зниженням степені дискретності нітридів. Внаслідок того, що нітриди заліза відрізняються невеликою термічною стійкістю і великою швидкістю коагуляції [3], твердість вуглецевих сталей мало залежить від температури азотування (крива 3 – рис. 5, а).

Згідно даних [9], дисперсність включень нітридів легуючих елементів чинить вирішальний вплив на величину і розподіл мікротвердості за товщиною азотованого шару. Так, дослідження тонкої структури азотованої сталі 40X за допомогою растрового електронного мікроскопу REM-200 показали, що за підвищення температури азотування із 833°K до 873°K площа поверхні нітридів збільшується в середньому у 38 разів і, відповідно, знижується мікротвердість.

Отримані результати підтверджуються даними рентгеноструктурного аналізу. Відомо, що максимальна мікротвердість азотованого шару відповідає утворенню когерентних зародків нітридної фази, що викликають найбільші спотворення кристалічної ґратки матриці, усереднене значення яких характеризується шириною і інтенсивністю дифракційних максимумів  $\alpha$ -фази. Із збільшенням температури азотування і зростанням нітридних часток когерентність порушується, спотворення ґратки матриці і твердість шару зменшуються (рис. 5, а).

Легуючі елементи, підвищуючи розчинність азоту в легованій  $\alpha$ -фазі, зумовлюють зменшення коефіцієнта його дифузії і призводять до зменшення товщини дифузійного шару. Також товщина зменшується із збільшенням вуглецю матриці. При цьому концентрація азоту в поверхневому шарі  $\epsilon$ -фази змінюється незначно. Так, кількість  $\epsilon$ -фази для сталі 20 становила 19%, а для сталі 45 – 21% [11].

Ураховуючи отримані залежності, під час проведення досліджень із модифікації робочої поверхні лап культиватора процес модифікації здійснювався за режимом, що забезпечує достатньо високі пластичні властивості модифікованого шару, щоб виключити сколювання та викришування ріжучого леза лапи культиватора та її затуплення в процесі роботи, із забезпеченням достатньої глибини азотованого шару: середовище – 25% N<sub>2</sub>+ 75% Ar; температура азотування – 520°С; тиск у розрядній камері – 200 Па; тривалість азотування – 6 год.

У результаті застосування цього способу модифікації отримано поверхневий шар товщиною 120...150 мкм із мікротвердістю H<sub>100</sub> 950...980 МПа, що опирається на пружну основу (гартована сталь 35Г після низькотемпературного відпуску, отриманого в процесі азотування H<sub>100</sub> 500...600 МПа) [13].



Рис. 6 – Зовнішній вигляд лапи культиватора, що модифікована азотуванням у тліючому розряді

Немодифіковані та модифіковані лапи були встановлені та випробовувалися на культиваторі моделі Tiger-Mate 200 у виробничих умовах на полях підприємства СТзОВ “Гарант” (Хмельницька область, Україна). У процесі випробовувань фіксувалася зміна розмірів лап (стирання) під час їх експлуатації. Результати випробувань підтвердили підвищення зносостійкості модифікованих лап у порівнянні із немодифікованими в 1,7...1,8 рази. Зовнішній вигляд лапи культиватора, що зміцнена безводневим азотуванням у тліючому розряді, показано на рис. 6.

### Висновки

1. На основі проведених досліджень і аналізу літературних джерел обґрунтовано важливість та актуальність вивчення тонких механізмів протікання процесів безводневого азотування металів у тліючому розряді для їх практичного застосування шляхом оптимальної комбінації параметрів технологічного режиму із пріоритетом енергетичних підходів.

2. Сформульовані загальні закономірності зміни мікротвердості нітридної зони залежно від автономних параметрів режиму азотування та проведено їх обґрунтування за результатами рентгеноструктурного аналізу фазового складу азотованих поверхонь.

3. Аналіз результатів проведених досліджень із підвищення зносостійкості лап культиватора шляхом їх безводневого азотування у тліючому розряді показав доцільність та перспективність застосування цього методу хіміко-термічної обробки для модифікації РО ґрунтообробних машин.

### Список посилань

1. Денисенко, М. І. Зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання / М. І. Денисенко, В. Д. Войтюк // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2016. – № 6. – С. 175–182.
2. Борак, К. В. Підвищення надійності робочих органів ґрунтообробних машин / К. В. Борак // Вісник Харківського

- національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2015. – Вип. 163. – С. 120–125.
3. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.
  4. Волков, Ю. В. Долговечность машин работающих в абразивной среде / Ю. В. Волков, З. А. Волкова, Л. М. Кайгородцев. – М. : Машиностроение, 1994. – 117 с.
  5. Саїнсу, О. Д. Підвищення довговічності лап культиваторів композиційними покриттями перемінного складу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 “Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва” / Саїнсу Олександр Дмитрович; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2008. – 20 с.
  6. Стечишин, М. С. Корозія і захист від корозії : навчальний посібник / М. С. Стечишин, В. П. Олександренко, Ю. М. Білик. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 197 с.
  7. Бобрицький, В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Бобрицький Віталій Миколайович; Національний транспортний університет. – Київ, 2007. – 20 с.
  8. Stechyshyn, M. S. Influence of the ionic nitriding of steels in glow discharge on the structure and properties of the coatings / M. S. Stechyshyn, A. V. Martynuk, Y. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, N. M. Stechyshyna // Materials Science. – 2017. – 53 (3). – P. 343–349.
  9. Лахтін, Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Металлургия, 1992. – 176 с.
  10. Арзамасов, Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.
  11. Каплун, В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 315 с.
  12. Пастух, И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
  13. Стечишин, М. С. Розробка і дослідження низькотемпературних газорозрядних технологій у подільському науковому фізико-технологічному центрі / М. С. Стечишин, М. В. Лук'янюк, В. П. Олександренко, М. М. Лук'янюк // Вісник ХНУ : Хмельницький. – 2019. – №3. – С. 6–12.

## DEVELOPMENT OF BRICE-BACKER GRAIN DRYER WITH RECUPERATION ON COMBINED FUELS

H. Tkachenko, L. Novak, I. Ulyanych, O. Yermeeva

Uman National University of Horticulture, Ukraine



### **Key words:**

dryer,  
recuperation,  
brice-baker,  
KMZ industries,  
alternative fuels

### **Article history:**

Received 29.04.2020

Accepted 28.05.2020

### **Corresponding author:**

tkachenkogenady@  
gmail.com

### **ABSTRACT**

*The article presents the results of full-scale tests of the experimental grain dryer BRICE-BAKER SCN-18/48 manufactured by KMZ industries with recuperation of hot air in combination with an experimental heat generator on alternative fuels produced by ON-STATE LLC. Ways to use alternative types of fuel for grain drying were presented in the article. Technical-and-economic grounds, technological scheme and working projects of a grain drying BRICE-BAKER SCN-18/48 and heat generator TPG-1/100 for combustion of fuel chips, pellets were developed. Injection of recuperative hot air “non-working” zones into the hot air distribution channels open on both sides solves two problems: minimal changes in the design of the grain dryer and condensate removal. In each section there are two rows of inlet and two rows of outlet air distribution channels. Two sections with through air distribution channels will provide recuperation of four sections of a drying zone without increase in speed of hot air and “removal” of easy impurity of grain mass. The efficient operation of the TPG-1/100 heat generator with an inertial filter provided the required volume of hot air without sparks and grain without the smell of smoke. No signs of moisture condensation were detected in the “non-working” zone. The recuperation system with the nominal capacity of the fans ensures the mixing of the hot air, so that the temperature difference does not exceed 6.5°C.*

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.305>



УДК 631.365:664.723

## **РОЗРОБКА ЗЕРНОСУШАРКИ BRICE-BAKER З РЕКУПЕРАЦІЄЮ НА КОМБІНОВАНИХ ВИДАХ ПАЛИВА**

**Г.В. Ткаченко, Л.Л. Новак, І.Ф. Улянич, О.А. Єремєєва**

Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна

*У статті наведено результати виробничих випробувань експериментальної зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48 виробництва “KMZ industries” із повторним використанням робочих газів у поєднанні із дослідним теплогенератором на альтернативних видах палива виробництва ТОВ “ОН-СТЕЙТ”. Також у статті представлені способи використання альтернативних видів палива для сушіння зерна. Найпоширенішими видами альтернативних видів палива є органічні відходи від вирощування та переробки сільськогосподарських культур (солома, відходи очищення зерна, лушпиння соняшнику), а також деревина (колоди, стружка деревини, тріска, гранули). Розроблені техніко-економічні основи, технологічна схема та робочі проекти зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48 та теплогенератора ТПП-1/100 для спалювання паливних трісок і гранул. Нагнітання у відкриті із обох сторін газорозподільні коробки зони “відлежування” рекупераційних газів вирішує дві проблеми: мінімальні зміни конструкції зерносушарки та видалення конденсату. У кожній секції розташовані два ряди підвідних та два ряди відвідних коробів. Дві секції з наскрізними коробами забезпечують рекуперацію чотирьох секцій зони сушіння без підвищення швидкості робочих газів та “виносу” легких домішок зернової маси. Ефективна робота теплогенератора ТПП-1/100 з інерційним фільтром забезпечує необхідний об’єм робочих газів без іскор та зерно без запаху диму. У зоні “відлежування” жодних ознак конденсації вологи не виявлено. Система рекуперації з номінальною продуктивністю вентиляторів забезпечує змішування робочих газів таким чином, що різниця температур не перевищує 6,5°C.*

**Ключові слова:** сушарка, рекуперація, BRICE-BAKER, KMZ industries, альтернативні види палива.

### **Стан питання та постановка проблеми**

Зниження собівартості сушіння істотно впливає на рентабельність роботи всього зернопереробного підприємства, особливо ураховуючи необхідність технологічного сушіння сої до 8% для переробки на олію

[1 – 3]. Вибір зерносушарки для будівництва другої черги елеватора на базі олієпресового заводу ТОВ АФ “Відродження” (с. Громада, Любарський район, Житомирська область, Україна) відбувався серед обладнання вітчизняних виробників. У 2017 році почала діяти державна програма відшкодування 20% (у 2018 р. – 25%) вартості обладнання вітчизняних товаровиробників, до якої було включено зерносушарки “KMZ industries” та “LUBNYMASH”. Позитивні відгуки керівництва агрохолдингу “Alebor group” та гнучкий підхід до клієнта менеджерів Карлівського машинобудівного заводу схили до вибору зерносушарки BRICE-BAKER “KMZ industries”. Зерносушарка має надійну модульну конструкцію, що дозволяє обрати необхідну продуктивність від 9,5 до 300 т/год. Система пиловидалення сушарки запобігає втратам маси легких домішок та відповідає жорстким екологічним нормам. Основним недоліком сушарки є відсутність рекуперації (повторного використання відпрацьованих робочих газів). Для вирішення цієї проблеми було розроблено проєкт зерносушарки BRICE-BACKER із рекуперацією [4].

Питання, що необхідно вирішити для створення рекуперації:

1. Мінімальні зміни в конструкції зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48.

2. Падіння продуктивності витяжних вентиляторів, за умови роботи твердопаливного теплогенератора із більшим аеродинамічним опором, знизить швидкість агента сушіння (АС) та його втрати (допустимо). Використання додаткових вентиляторів рекуперації покращить режим роботи витяжних.

3. Передбачити додаткові перегородки у каналах відпрацьованих робочих газів зони охолодження для організації “відлежування” і зміни кількості секцій рекуперації в зоні сушіння та охолодження.

4. Передбачити жалюзі із приводом для вентиляторів рекуперації (закриття в момент вивантаження зерна для запобігання “виносу” легких домішок зернової маси).

5. Передбачити шибери на газовий пальник та твердопаливний теплогенератор.

6. Зменшення перерізу камери подачі АС за рахунок каналу рекуперації зумовить зниження швидкості АС у нижній частині зони сушіння (допустимо).

7. Збірна конструкція зерносушарки передбачає ребра жорсткості, які створюють додатковий аеродинамічний опір в каналі рекуперації. Канал рекуперації у вигляді “перегородки” на ширину зерносушарки додає міцності конструкції, полегшить його виготовлення на заводі та

знизить втрати тиску робочих газів у ньому. За можливості розширити канал подачі АС за рахунок збільшення зовнішніх розмірів сушарки.

8. Два радіальних вентилятори рекуперації (по одному в кожному модулі) забезпечать однакову швидкість робочих газів за всією шириною зерносушарки.

У більшості відомих зерносушарок канал рекуперації проходить між підлогою та розвантажувальним механізмом, що ускладнює доступ до нього, а також вимагає герметичної ізоляції, значної зміни конструкції зерносушарки. Позитивний досвід експлуатації сушарки ДСП-32-2М [3, 5] із зонами “відлежування” довів необхідність мінімальної подачі робочих газів у газорозподільні коробки з метою недопущення утворення конденсату. Проте, навіть за незначного нагрівання поверхні зерна у зоні “відлежування” знижується інтенсивність термовологопереміщення в середині зерна. Невеликі отвори у глухих стінках газорозподільних коробів зони сушіння у заводському виконанні ефективно видаляють конденсат, але призводять до непродуктивних витрат АС.

**Мета дослідження** – дослідити процес змішування топкових газів та робочих газів повторного використання; встановити можливість теплогенератора ТПП-1/100 забезпечили необхідний об’єм робочих газів та їх якість для сушіння зерна без запаху диму; дослідити можливість утворення конденсату в зоні “відлежування”.

### **Матеріали і методи**

Зерносушарка BRICE-BAKER SCN-18/48 (за зниження вологості пшениці з 19% до 14% її продуктивність 100 т/год.) із рекуперацією на комбінованих видах палива має газові пальники та теплогенератор на альтернативних видах палива (паливна тріска або гранули) ТПП-1/100 (10 МВт), ТОВ “ОН-СТЕЙТ” (Дніпро, Україна).

Автоматизація сушарки виконана субпідрядником “KMZ industries” – ООО “СИСЭЙТИ” (Білорусь) на основі технологічного алгоритму Г.В. Ткаченка. Алгоритм виконується контролерами Schneider Electric (Франція). Датчики вологості зерна в потоці на вході та виході продукту виробництва ДНВП “Ельдorado” (Дніпро, Україна). Датчики відносної вологості робочих газів Galltec+Mela KPC3.S/5 (7 шт., Німеччина). Термоперетворювачі Pt100 ПАТ “ТЭРА” (Чернігів, Україна). Панель оператора, частотні перетворювачі, кабельно-провідникова продукція виробництва фірми Schneider Electric (Франція). Під час дослідження проводили сушіння партії зерна кукурудзи фуражного призначення зі зниженням вологості від 19,0...21,0% до 14,5...15,0%.

### Результати дослідження та обговорення

Нагнітання у відкриті з обох сторін газорозподільні коробки зони “відлежування” рекупераційних газів вирішує дві проблеми: мінімальні зміни конструкції зерносушарки та видалення конденсату.

У кожній секції розташовані два ряди підвідних та два ряди відвідних коробів. Дві секції із наскрізними коробами забезпечать рекуперацію чотирьох секцій зони сушіння без підвищення швидкості робочих газів. Використання наскрізних коробів із швидкістю руху робочих газів, що не перевищує швидкість в інших, не призведе до “виносу” легких домішок зернової маси.

Схема роботи зерносушарки у базовому режимі представлена на рис. 1, а. Шахта зерносушарки містить зону сушіння, зону “відлежування” із наскрізними коробами та зону охолодження. Передбачено можливість одночасної роботи зерносушарки із твердопаливним теплогенератором. У сушарці об’єм робочих газів регулюють клапаном, а шиберами встановлюють об’єм атмосферного повітря, що надходить до газового пальника. Нерухома перегородка відокремлює робочі гази зони сушіння та рекуперації. Додаткові втрати тиску, що виникають у наскрізних коробах, компенсуються встановленням радіального вентилятора. Оскільки в зоні “відлежування” зерна всі коробки відкриті з обох боків шахти, їхня кількість дорівнює кількості відвідних коробів у чотирьох секціях зони сушіння, тому швидкість робочих газів у коробах зони сушіння та “відлежування” однакова. Жалюзійною решіткою регулюють швидкість робочих газів, не допускаючи “виносу” продукту із шахти. Під час відкриття розвантажувального пристрою жалюзійна решітка закрита. За роботи у базовому режимі нижня рухома перегородка знаходиться у верхньому положенні, а зона охолодження максимальна і складається із чотирьох секцій. За необхідності схему роботи зерносушарки у базовому режимі можна модифікувати. Схема роботи зерносушарки у режимі без рекуперації зображена на рис. 1, б. За сушіння насіння сояшнику виникає необхідність відмовитися від рекуперації робочих газів із зони охолодження та сушіння для попередження виникнення пожежі. Вентилятор рекуперації робочих газів зупиняють та закривають жалюзійну решітку. Демонтують верхню рухома перегородку. Робочі гази із зони охолодження пропускаються через наскрізні коробки зони “відлежування”.

Схема роботи зерносушарки у режимі без рекуперації робочих газів зони сушіння представлена на рис. 2, а. Верхню рухома перегородку встановлюють між зоною сушіння та “відлежування”. Відпрацьовані робочі гази зони сушіння видаляються із сушарки без рекуперації.

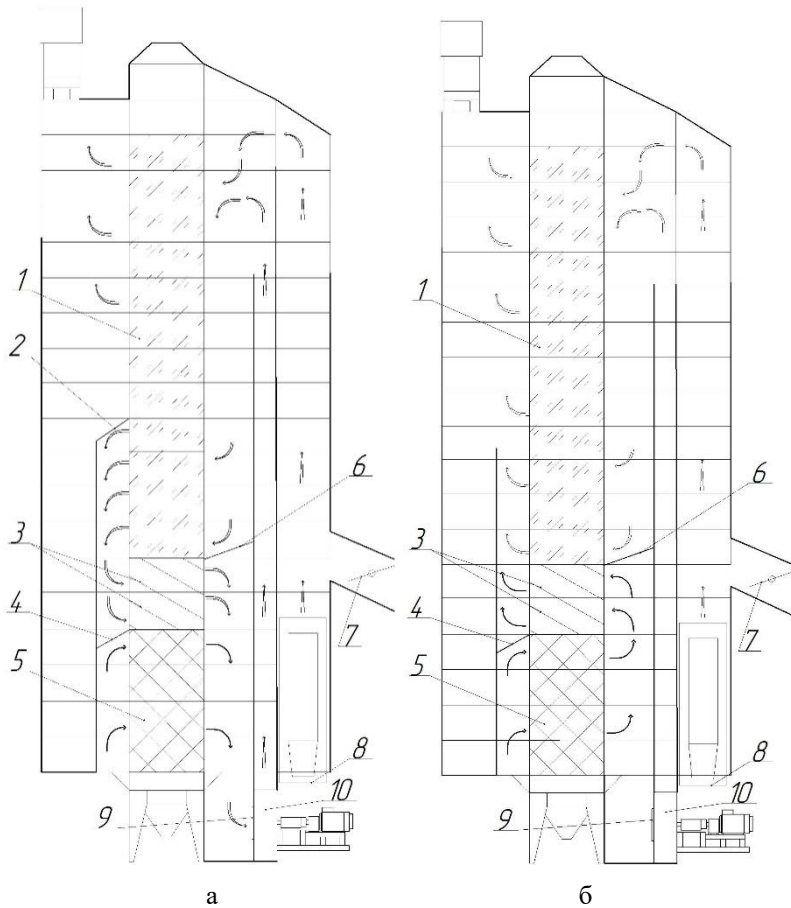


Рис. 1 – Шахтна зерносушарка BRICE-BAKER SCN-18/48 із повторним використанням робочих газів:  
 а – базовий режим; б – режим без рекуперації:  
 1 – зона сушіння; 2 – зона “відлежування”; 3 – наскрізні короби;  
 4 – рухома перегородка; 5 – зона охолодження;  
 6 – нерухома перегородка; 7 – клапан; 8 – шибер;  
 9 – жалюзійна решітка; 10 – радіальний вентилятор

Нижня рухома перегородка встановлена між зонами “відлежування” та охолодження. Робочі гази зони охолодження вентилятором рекуперації подаються у зону нагрівання. Усі короби

зони “відлежування” відкриті з обох боків, тому навіть незначний потік робочих газів ефективно видаляє конденсат з їхніх стінок.

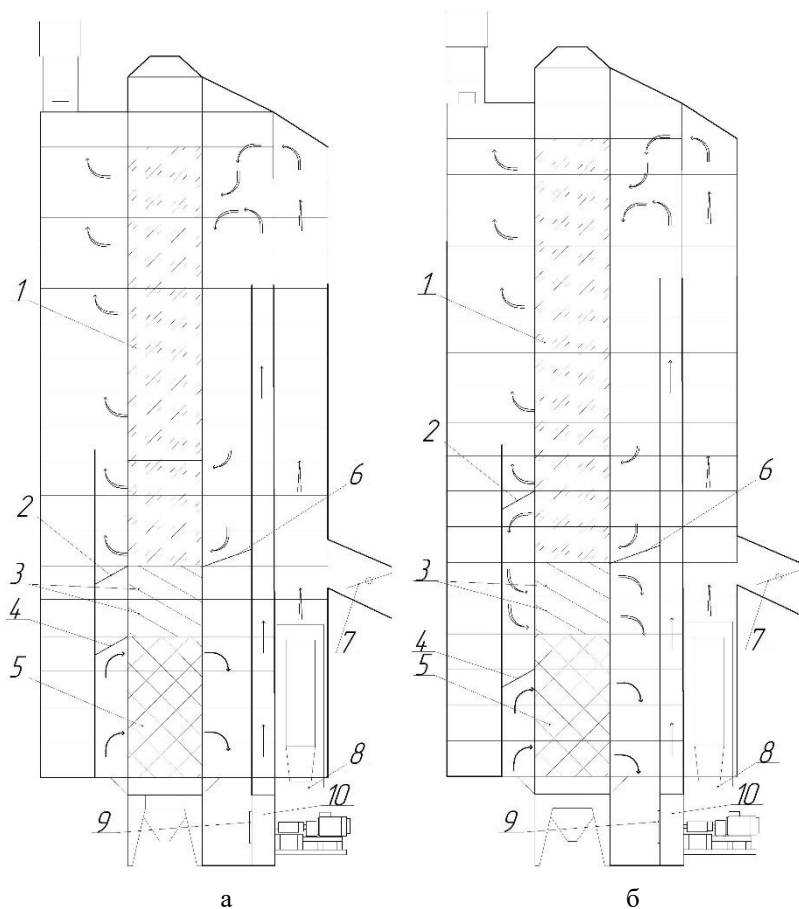


Рис. 2 – Шахтна зерносушарка BRICE-BAKER SCN-18/48

з повторним використанням робочих газів:

а – режим без рекуперації робочих газів зони сушіння;

б – зі збільшеною зоною “відлежування”:

1 – зона сушіння; 2 – рухома перегородка; 3 – наскрізні короби;

4 – рухома перегородка; 5 – зона охолодження;

6 – нерухома перегородка; 7 – клапан; 8 – шибер;

9 – жалюзійна решітка; 10 – радіальний вентилятор

Схема роботи зерносушарки у режимі зі збільшеною зоною “відлежування” представлена на рис. 2, б. У холодну пору року для охолодження достатньо двох або трьох секцій. Нижньою рухомою перегородкою відокремлюють необхідну кількість секцій, незадіяні секції збільшують зону “відлежування”.

Поєднання у різних комбінаціях окремих елементів режиму роботи дозволяє оптимально налаштувати зерносушарку відповідно до зовнішніх умов та продукту сушіння.



Рис. 3 – Монтаж зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48

Пуско-налагоджувальні роботи відбувалися із використанням твердопаливного теплогенератора із підвищеною потужністю 10 МВт та додатковими вентиляторами початкового запуску (рис. 3). Відсутність іскор на виході із інерційного фільтру фіксувалася візуально у темну пору доби. Неповне перекриття шиберів перемикання зі “стартових” вентиляторів теплогенератора на вентилятори зерносушарки стало причиною нерівномірного розподілу робочих газів у першу та другу шахти (рис. 4). Нерівномірність була найбільшою для чотирнадцятої секції за частоти 30 Гц та 40 Гц –  $+10,6^{\circ}\text{C}$  та  $+10,9^{\circ}\text{C}$  (рис. 5) і дещо знизилась із підвищенням продуктивності вентиляторів рекуперації ( $+6,7^{\circ}\text{C}$ ).

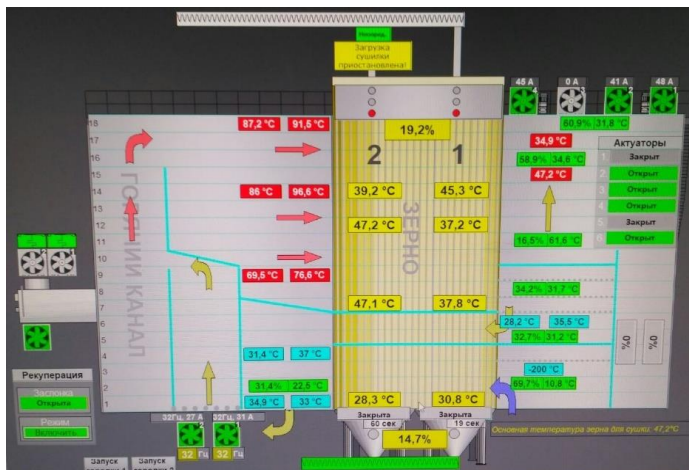


Рис. 4 – Автоматизоване робоче місце оператора зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48

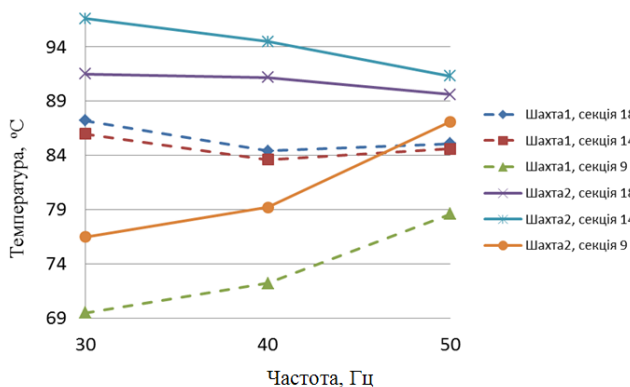


Рис. 5 – Залежність температури робочих газів зони сушіння від частоти струму двигунів рекуперації

Рекупераційні гази мають високий вміст органічного пилу, що може легко займатися в полум'ї пальника, тому їх краще домішувати до топкових газів на максимальній відстані від факелу. Але за таких умов зменшується період часу для перемішування топкових та рекупераційних газів. За низьких обертів вентилятора рекуперації спостерігалася велика різниця у температурі робочих газів за висотою



зони сушіння – 17,7°C та 15°C у першій та другій шахті відповідно. Підвищення продуктивності вентилятора знижувало цю різницю до 6,5°C та 4,2°C у першій та другій шахті відповідно.

Слабкий запах диму відчувався у пробах відібраних безпосередньо із розвантажувального механізму зерносушарки лише за нагрівання водяною парою у лабораторії. У пробах, відібраних за дві доби після сушіння із силосу, запаху диму не виявлено.

### **Висновки**

Виробничі випробування зерносушарки BRICE-BAKER SCN-18/48 із рекуперацією робочих газів за умови використання паливних гранул із лузги соняшнику довели ефективність запатентованої корисної моделі. Ефективна робота теплогенератора ТПГ-1/100 із інерційним фільтром забезпечили необхідний об'єм робочих газів без іскор та зерно без запаху диму. У зоні “відлежування” жодних ознак конденсації вологи не виявлено. Система рекуперації із номінальною продуктивністю вентиляторів забезпечує змішування робочих газів, таким чином, що різниця температур не перевищує 6,5°C.

### **Список посилань**

1. Патент №110506 UA, МПК C11B1/04, A23P30/20. Спосіб підготовки насіння сої дробленням для вилучення олії екструзією з наступним пресуванням / Марцун О. М., Осокіна Н. М., Янюк Т. В., Ярошенко В. В., Ткаченко Г. В.; заявл. 14.04.2016; опубл. 10.10.2016; Бюл. №19, 2016 р.
2. Патент №110507 UA, МПК C11B1/04, A23P30/20. Спосіб підготовки насіння сої площенням для вилучення олії екструзією з наступним пресуванням / Марцун О. М., Осокіна Н. М., Янюк Т. В., Ярошенко В. В., Ткаченко Г. В.; заявл. 14.04.2016; опубл. 10.10.2016; Бюл. №19, 2016 р.
3. Патент №139774 UA, МПК F26B 17/00. Спарена шахтна зерносушарка з одним топковим відділенням / Марцун О. М., Осокіна Н. М., Скобленко В. П., Ярошенко В. В., Ткаченко Г. В.; заявл. 21.05.2019; опубл. 27.01.2020; Бюл. №2, 2020 р.
4. Патент №139775 UA, МПК F26B 17/00. Шахтна зерносушарка з повторним використанням робочих газів / Марцун О. М., Осокіна Н. М., Улянич І.Ф., Ярошенко В. В., Ткаченко Г. В.; заявл. 21.05.2019; опубл. 27.01.2020; Бюл. №2, 2020 р.
5. Ткаченко, Г. В. Експлуатація одного топкового відділення з двома зерносушарками ДСП-32 для сушіння насіння сої / Г. В. Ткаченко, Л. Л. Новак, Н. М. Осокіна // Хранение и переработка зерна. – 2017. – №6.– С. 30–35.

**JUSTIFICATION OF PREPARATION TECHNOLOGY OF FLAX FIBER CONTENT FABRIC****O. Tkachuk<sup>1</sup>, O. Ostapchuk<sup>2</sup>, O. Herasymchuk<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine<sup>2</sup>Private joint stock company “Edelvika”, Lutsk, Ukraine**Key words:**

boiling,  
flax,  
bath composition,  
capillarity,  
breaking load

**Article history:**

Received 23.03.2020

Accepted 28.05.2020

**Corresponding author:**

alex\_gop\_ukr@ukr.net

**ABSTRACT**

*In the article the composition of a boiling bath for the preparation of polyester-cotton-linen fabric in a periodic method is proposed. Studies were conducted on the fabric TPK-11 produced by private joint stock company “Edelvika” (Lutsk). Was determined the effect of alkaline agents, reducing agents and surfactants on the indicators of quality of boiled and bleached polyester-cotton-linen fabric: capillarity, hygroscopicity, wettability, breaking load and degree of whiteness. It is determined that the maximum indicators of capillarity and degree of whiteness are achieved at concentrations of sodium hydroxide and sodium carbonate of 6% and 7.5%. The using of reducing agents: sodium bisulfite and sodium dithionite slightly increases the capillarity, wettability and hygroscopicity, but promotes to increase indicators of the breaking load and the degree of whiteness. As a result of performed experimental research and analysis of the influence of components and their concentrations in the boiling bath on the hydrophilic properties, strength and degree of whiteness of flax-containing textile material, the choice of sodium carbonate as an alkaline agent and sodium dithionite as a reducing agent are justified. Composition for boiling of polyester-cotton-linen fabric containing sodium carbonate – 6%, surfactant (Kolovet AN) – 0.35%, sodium dithionite ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) – 2%, is recommended.*

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.302>

УДК 677.077

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДГОТОВКИ ТКАНИНИ ІЗ  
ВМІСТОМ ЛЛЯНОГО ВОЛОКНА****О.Л. Ткачук<sup>1</sup>, О.В. Остапчук<sup>2</sup>, О.П. Герасимчук<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>Приватне акціонерне товариство “Едельвіка”, Луцьк, Україна

---

*У статті запропоновано склад відварювальної ванни для підготовки поліестеро-бавовняно-ляної тканини періодичним способом. Дослідження проводилися на тканині арт. ТПК-11 виробництва ПрАТ “Едельвіка” (Луцьк). Було визначено вплив лужних агентів, відновників та поверхнево-активних речовин (ПАР) на показники якості відвареної та відбіленої поліестеро-бавовняно-ляної тканини: капілярність, гігроскопічність, змочуваність, розривальне навантаження та ступінь білості. Визначено, що максимальні показники капілярності та ступеню білості досягаються за концентрації гідроксиду натрію та карбонату натрію 6% і 7,5%. Застосування відновників: бісульфіту натрію та дітіоніту натрію незначно підвищує показники капілярності, змочуваності та гігроскопічності, а також сприяє підвищенню показника розривального навантаження та ступеню білості. У результаті виконаних експериментальних досліджень та аналізу впливу складу і концентрації препаратів у відварювальній ванні на гідрофільні властивості, міцність та ступінь білості льономісного текстильного матеріалу обґрунтовано вибір у якості лужного агенту карбонату натрію, а у якості відновника – дітіоніту натрію. Рекомендовано склад для відварювання поліестеро-бавовняно-ляної тканини, що містить карбонату натрію – 6%, ПАР (Коловет АН) – 0,35%, натрію дітіоніт ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) – 2%.*

**Ключові слова:** відварювання, льон, склад ванни, капілярність, розривальне навантаження.

---

**Стан питання та постановка проблеми**

Якість лляних і льономісних тканини, зокрема їх гігієнічні та експлуатаційні властивості (висока гігроскопічність, міцність, повітропроникність, незначний питомий поверхневий електричний опір), формуються на етапах, починаючи від вирощування льону і закінчуючи текстильною промисловістю.

Вихід волокна льону та його якість залежить від технології збирання та переробки. Волокна розрізняють за довжиною технічних комплексів, які містяться в ньому: чесаний льон (найдовші комплекси), очіс, коротке волокно. Також волокно розрізняють за способом виділення зі стебла та соломи: сланке, паренцеве, моченцеве, луб'яне.

Усі ці відмінності волокон позначаються на виборі умов проведення хімічних обробок у текстильній галузі, яка є важливим та необхідним сегментом економіки України. Висока вартість продукції текстильної промисловості зумовлена відсутністю вітчизняної сировини і високими цінами на енергоносії та матеріали. Зростання конкурентоспроможності галузі на світовому і на внутрішньому ринках відбувається паралельно із розвитком сільськогосподарського виробництва та переробної промисловості і, на думку вітчизняних та міжнародних експертів, має значний потенціал [1, 2].

Розвиток галузі потребує впровадження сучасних технологій, інтенсифікації технологічних процесів, розробки препаратів та складів для випуску конкурентоспроможної продукції. Нові технології повинні забезпечувати економічність виробництва, екологічність текстильних матеріалів та високий рівень їх якості.

Зростаючі вимоги до якості текстильної продукції потребують створення нового покоління текстильних матеріалів, які характеризуються комплексом функціональних властивостей. Цього можна досягти створенням тканин із натуральних та хімічних волокон, які забезпечували б найкраще поєднання фізико-механічних, санітарно-гігієнічних та експлуатаційних властивостей.

Продукція з льону користується попитом завдяки унікальному комплексу цінних властивостей: гігієнічність, висока міцність, еластичність, низький електричний опір, природна бактерицидність. Перспективними є також сумішеві льоновмісні тканини [3, 4]. Використання текстильних матеріалів із сумішей волокон потребує створення спеціальних технологій оздоблення. Для розробки технології оздоблення необхідно урахувати властивості кожного волокнистого компоненту, їх відношення до хімічних матеріалів та допоміжних речовин.

Тому дослідження, спрямовані на пошук раціональної технології для підготовки льоновмісного текстильного матеріалу, яка дозволить знизити собівартість продукції і підвищити її конкурентоспроможність, є актуальними.

**Мета дослідження** – встановити вплив компонентів відварювального розчину та їх концентрацій на показники якості

сумішевої льоновомісної тканини та розробити склад відварювальної ванни для отримання високоякісної продукції періодичним способом.

### Матеріали і методи

Дослідження проводилися на тканині арт. ТПК-11 виробництва ПрАТ “Едельвіка” (Луцьк). Характеристика тканини представлена в таблиці 1. Відварювання проводилося в лабораторних умовах періодичним способом (на фарбувально-роликовій машині) за температури +95°C протягом 1 год. за модуля ванни М = 1:15. Після відварювання зразки відбілювали за рецептом на основі перекису водню в однакових умовах. Якість тканини після відварювання оцінювалася за капілярністю через 1 год. (мм), гігроскопічністю (%), змочуваністю (с); після відбілювання – за розривальним навантаження (Н) та ступенем білості (%).

Таблиця 1 – Фізико-механічні показники тканини

Показники	Величина
Склад сировини, %	50 поліестер + 30 бавовна + 20 льон
Розривальне навантаження, Н:	
- основа	610
- уток	591
Поверхнева щільність, г/м <sup>2</sup>	152,3

Гігроскопічність та капілярність визначали за ДСТУ 3816:2009 (ISO 811–81) “Полотна текстильні. Методи визначення гігроскопічних та водовідштовхуючих властивостей”. Гігроскопічність визначали за вологості 98±1% впродовж чотирьох годин. Капілярність вимірювали на приладі PU-4. Розривальне навантаження визначали на розривній машині РМ-250М.

### Результати дослідження та обговорення

Найбільші труднощі під час підготовки лляного волокна пов'язані із наявністю високого вмісту лігніну, кольорових пігментів та супутніх природних домішок. Кардочесальна змішана пряжа із вмістом бавовняних та лляних волокон містить багато “галочок” та костри, що свідчить про наявність великої кількості лігніну у волокні. Лляні та бавовняні тканини потребують лужно-відновного відварювання та відбілювання із використанням окисників.

Традиційно для відварювання текстильних матеріалів використовують розчини, що містять їдкий натр (NaOH), ПАР, бісульфіт натрію (NaHSO<sub>3</sub>) та силікат натрію (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O) [5].

Силікати натрію, осідаючи на поверхні волокна та обладнання, призводять до пошкодження тканин та забруднення обладнання.

Для розробки нових ефективних і економічно вигідних композицій для підготовки текстильних матеріалів потрібно вирішити задачі:

- визначити вплив лужних агентів (гідроксиду натрію та карбонату натрію) та їх концентрацій на якість підготовки змішаної тканини;
- порівняти вплив лужного та лужно-відновного відварювання.

Як лужний агент, для відварювання бавовняних волокон широко застосовується гідроксид натрію, а для відварювання льону – карбонат натрію [5]. Необхідно дослідити вплив природи лужного агента на процес відварювання сумішевої поліестеро-бавовняно-лляної тканини. Результати дослідження впливу концентрацій гідроксиду натрію та карбонату натрію на фізико-механічні показники відвареної тканини представлені на рис. 1 за концентрації ПАР (коловет АН) 0,35%.

Як видно із діаграм (рис. 1, рис. 2), за збільшення концентрації гідроксиду натрію від 3,0% до 7,5% підвищується капілярність текстильного матеріалу із 167 мм до 191 мм, покращується змочуваність та гігроскопічність. Подальше збільшення концентрації NaOH від 7,5% до 15,0% незначно впливає на зміну показників капілярності, гігроскопічності та змочуваності, а отже є недоцільним. Із підвищенням концентрації їдкового натру знижується міцність тканини, про що свідчить зміна показника розривального навантаження із 601 Н до 561 Н. Збільшення концентрації карбонату натрію у відварювальній ванні від 3,0% до 7,5% також сприяє підвищенню капілярності тканини від 160 мм до 195 мм, покращенню змочуваності і гігроскопічності. Подальше збільшення концентрації Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> від 7,5% до 15,0% не впливає суттєво на зміну показників капілярності, гігроскопічності та змочуваності. Також встановлено, що зі збільшенням концентрації карбонату натрію від 3,0% до 15,0% показник розривального навантаження знижується із 622 Н до 575 Н. Порівняння впливу двох лужних агентів свідчить, що за застосування карбонату натрію тканина набуває кращих гідрофільних властивостей і в меншій мірі знижується міцність тканини. Результати досліджень (рис. 1, рис. 2) свідчать, що максимальні показники капілярності та ступеню білості досягаються за концентрації гідроксиду натрію та карбонату натрію 6,0% та 7,5%. Тому в наступних дослідженнях ці лужні агенти застосовували у зазначених концентраціях. Під час лужного відварювання за високої температури виникає небезпека окислювальної деструкції целюлози. Для запобігання деструкції у відварювальну ванну вводять антиоксиданти, найчастіше застосовують відновники – натрію гідросульфід, сульфід, дітїоніт тощо [5, 6].

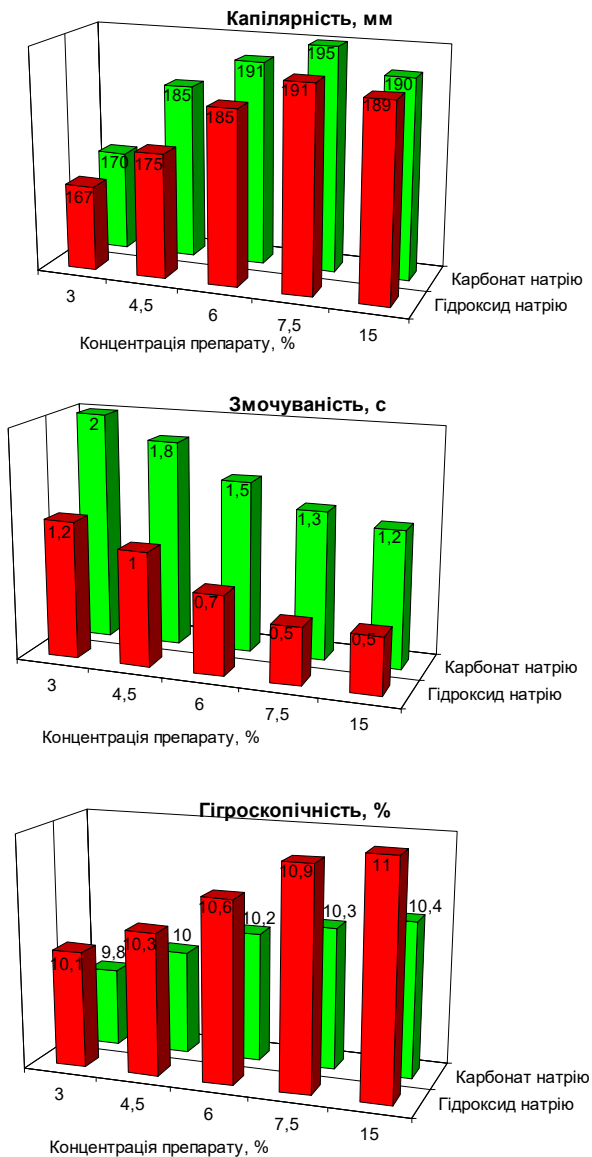


Рис. 1 – Вплив концентрацій гідроксиду натрію та карбонату натрію на капілярність, змочуваність і гігроскопічність відвареної тканини

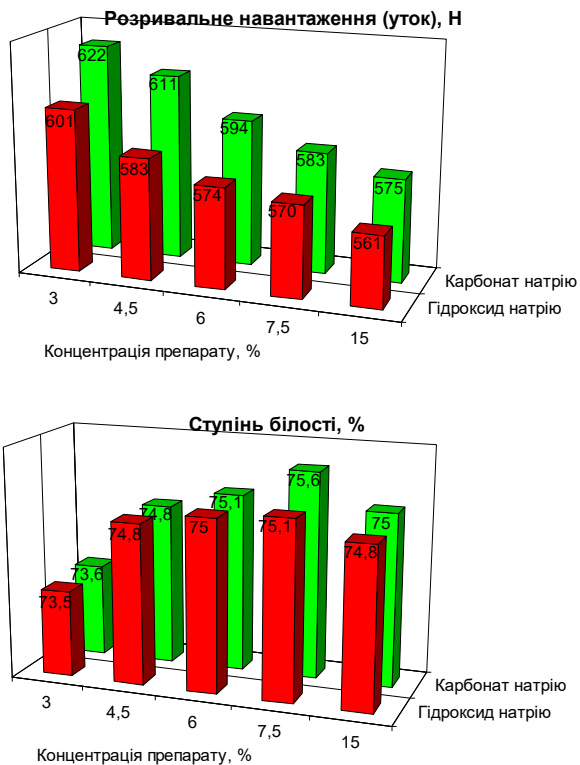


Рис. 2 – Вплив концентрацій гідроксиду натрію та карбонату натрію на розривальне навантаження і ступінь білості відвареної тканини

Із метою визначення впливу різних відновників на якість підготовки текстильного матеріалу у відварювальні розчини, які містили гідроксид натрію та карбонат натрію індивідуально і разом, вводили натрію бісульфіт та натрію дітйоніт.

Склади відварювальних ванн представлені в таблиці 2, а результати досліджень на рис. 3 та на рис. 4. Аналіз рис. 1 – 4 свідчить, що застосування відновників бісульфіту натрію та дітйоніту натрію незначно підвищує показники капілярності, змочуваності і гігроскопічності, а також сприяє підвищенню розривального навантаження та ступеню білості. Порівняння впливу двох відновників на показники ступеню білості та розривального навантаження (рис. 3, рис. 4) дозволяють зробити висновок, що дітйоніт натрію сприяє



кращому відбілюванню текстильного матеріалу, проте, менше захищає від окислювальної деструкції.

Таблиця 2 – Склади відварювальних ванн із відновниками

Назва препарату	Концентрація препарату, %					
	Варіанти складів					
	1	2	3	4	5	6
Гідроксид натрію	7,5	6,0			2,5	4,5
Карбонат натрію			7,5	6,0	4,5	2,5
ПАР (Коловет АН)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Натрію бісульфіт ( $\text{NaHSO}_3$ ) або натрій дітїоніт ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ )	2	2	2	2	2	2

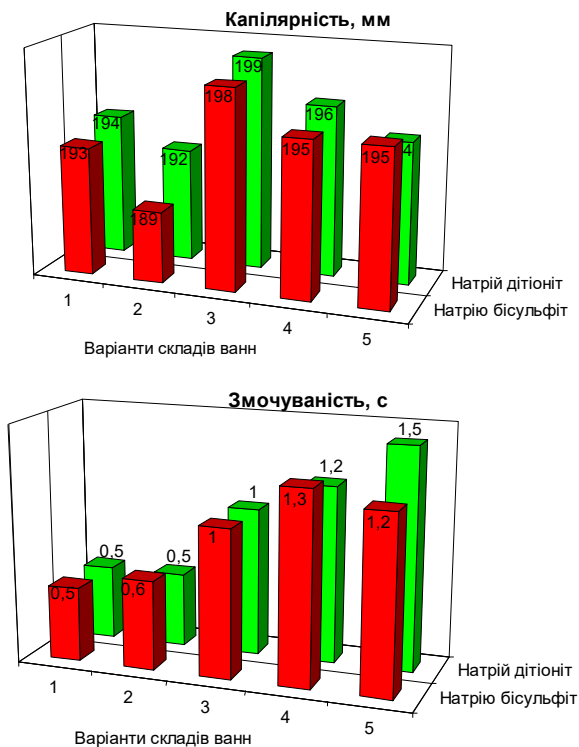


Рис. 3 – Вплив відновників бісульфіту натрію та дітїоніту натрію на капілярність і змочуваність відвареної тканини

Порівняно із суворою тканиною зниження міцності підготовленої тканини є дуже незначним, тому в якості відновника рекомендуємо застосовувати дітіоніт натрію. Незначні зміни міцності тканини пов'язані із сіднанням текстильного матеріалу в процесі підготовки.

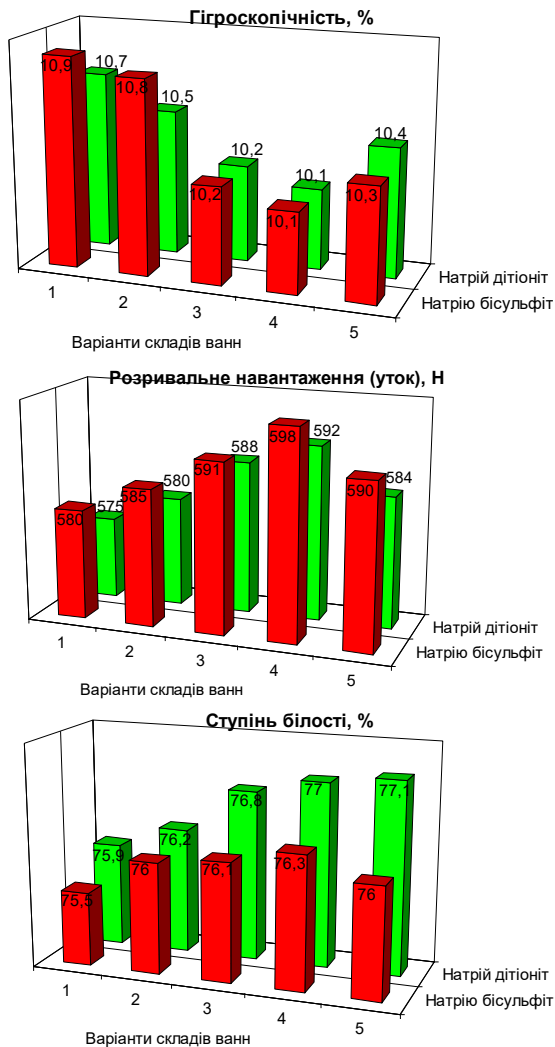


Рис. 4 – Вплив відновників бісульфіту натрію та дітіоніту натрію на гігроскопічність, розривальне навантаження і ступінь білості відвареної тканини

Як видно із рис. 3 та рис. 4, тканина, відварена із застосуванням лужно-содового розчину (варіанти 5, 6), характеризується нижчою капілярністю, гігроскопічністю та змочуваністю порівняно із обробкою карбонатом натрію, проте, більшою міцністю, ніж за обробки із застосуванням гідроксиду натрію.

Застосування різних показників оцінювання якості відвареної тканини дозволяє визначити вплив компонентів відварювального розчину та їх концентрацій і розробити склад для відварювання льономісної текстильної тканини, який забезпечить високі показники якості. За результатами досліджень пропонується такий склад для відварювання льономісної тканини, що містить карбонат натрію 6%, ПАР (Коловет АН) 0,35%, натрію дітіоніт ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) 2%.

### Висновки

У результаті аналізу виконаних експериментальних досліджень впливу компонентів та їх концентрації у відварювальній ванні на гідрофільні властивості, міцність та ступінь білості льономісного текстильного матеріалу обґрунтовано вибір в якості лужного агента карбонату натрію, а в якості відновника – дітіоніту натрію. Рекомендований склад для відварювання поліестеро-бавовняно-ляної тканини, що забезпечує високі гігроскопічні показники та споживчі властивості текстильного матеріалу.

### Список посилань

1. Касьян, Л. Е. Стан та перспективи розвитку легкої промисловості України / Л. Е. Касьян // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Міжнародні економічні відносини та світове господарство. – 2016. – Вип. 6(1). – С. 147–150.
2. Фаріон, Н. О. Сучасний стан легкої промисловості України : проблеми та шляхи їх вирішення / Н. О. Фаріон // Електронне наукове фахове видання “Ефективна економіка”. – 2015. – №10.
3. Фомченкова, Л. И. Рынок льняных тканей и льоноволокна / Л. И. Фомченкова // Текстильная пром-сть. – 2003. – №3. – С. 85–87.
4. Остапчук О. В. Дослідження фізико-механічних властивостей платтяно-костюмних тканин / О. В. Остапчук, Г. С. Сарібеков, О. Л. Ткачук // Вісник ХНТУ. – 2014. – №3(50). – С. 77–80.
5. Кричевский, Г. Е. Химическая технология текстильных материалов : учеб. для вузов : в 3 т. Т.1. / Г. Е. Кричевский. – Москва : МГУ, 2000. – 436 с.
6. Кричевский, Г.Е. Теория и практика подготовки текстильных материалов (из целлюлозных волокон) / Г. Е. Кричевский, В. А. Никитков. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 208 с.

## A CONCEPT MODEL OF TECHNOLOGIES FOR PROCESSING FLAX STEMS

S. Yaheliuk, V. Didukh

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



**Key words:**  
concept model,  
processing,  
flax,  
stem,  
classification

**Article history:**  
Received 05.10.2019  
Accepted 26.05.2020

**Corresponding author:**  
cler2010@gmail.com

### ABSTRACT

*In the paper a classification of flax stems (straw) is suggested. It allows choosing an efficient technology to process the stems at the stage of flax harvesting. A concept model of technologies for processing flax stems is substantiated based on the developed classification. The situation in Ukrainian flax industry today is ambiguous. There is a significant decrease in textile flax production and an increase in oleaginous flax production. There are differences between oleaginous flax that was grown in various climates the researches have shown. The experiments have proved that the varieties of oleaginous flax growing in the wet and cold climate have a length that allows the stems to be processed into a fiber. Flax stem fiber mass windrows are remained in the field during a harvesting. However, agricultural producers do not have the appropriate technologies and tools. There was based a concept model of resource-saving technology to harvest flax stems by simultaneously processing flax stem fiber mass into the produce of diverse functional application, such as small-sized fuel rolls, fuel briquettes and fiber, according to flax stem classification properties. On the basis of it the offers concerning technologies of harvesting of flax with simultaneous processing of stalks and processing of flax stem fiber mass for agricultural producers are submitted.*

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.300>

УДК 677.11:677.021.15

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ

С.В. Ягелюк, В.Ф. Дідух

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*У статті запропонована концептуальна модель комплексних технологій переробки стебел льону залежно від класифікаційних ознак стеблостою. Ситуація у вітчизняному льонарстві на сьогодні неоднозначна. Спостерігається значне зменшення виробництва льону на волокно і зростання виробництва льону на насіння. Також, на основі існуючих досліджень, можна стверджувати, що в Україні зростає інтерес до комплексної переробки луб'яних культур. Основними виробниками льону олійного в Україні є південні та східні області. Західна Україна традиційно вважається виробником льонудовгуця. Проте, за останні чотири роки на цих територіях з'явилося й стрімко зростає виробництво льону олійного. Дослідження показали значні відмінності між льоном олійним, який вирощений у різних природно-кліматичних умовах. Особливістю сортів льону олійного, вирощеного у вологих та прохолодних умовах, є значне збільшення довжини стебла. Висока урожайність стеблової частини ускладнює застосування традиційної технології збирання льону олійного, яка передбачає використання зернозбиральних комбайнів. Після видалення насіння на полі лишаються валки стебло-волокнистої маси, яка потребує подальшої переробки. Однак, агровиробники не мають відповідних технологій і засобів. У результаті проведених досліджень розроблена концептуальна модель ресурсозберігаючих технологій збирання стебел льону з одночасною переробкою стебло-волокнистої маси в продукцію різного функціонального призначення: малогабаритні паливні рулони, паливні брикети та волокно, залежно від класифікаційних ознак стебел льону. На її основі подані пропозиції щодо технологій збирання льону з одночасною обробкою стебел й переробкою стебло-волокнистої маси для агровиробників.*

**Ключові слова:** *концептуальна модель, технології первинної переробки, льон, стебло, класифікація.*

### Стан питання та постановка проблеми

На основі існуючих досліджень та відповідно до розвитку світового та вітчизняного ринку льону можна стверджувати, що стан

льоновиробництва залежить від комплексного використання всіх складових льону олійного та льону-довгунця [1 – 3].

Способом подолання кризи в Україні є введення льону олійного у сівозміни північно-західних районів і поступове відновлення виробництва льону-довгунця. Експерименти у прохолодних, вологих кліматичних умовах показали, що сорти льону олійного можуть мати довжину, яка дозволяє переробляти стебла на волокно [4]. За наявної технології під час збирання комбайном на полі залишаються валки стебло-волоконистої маси (СВМ). СВМ – це маса неорієнтованих, ушкоджених стебел, яка утворюється при збиранні й очісуванні льону зернозбиральним комбайном. Ці стебла мають значні розміри та довго не перетворюються у тресту шляхом росяного мочіння. Це призводить до накопичення неперероблених рослинних залишків.

Показники якості стеблостою, особливо фаза стиглості, довжина та погодні умови на момент збирання льону олійного та льону-довгунця, визначають подальші шляхи його використання [5 – 9]. Зібрати товарні посіви льону бажано у фазі ранньої жовтої стиглості, коли половина коробочок має жовтий колір, а решта коробочок бурі, зелено-жовті і зелені. Тоді отримують волокно і насіння належної якості. Це можливо за сприятливих погодних умов й потрібно здійснити у короткі терміни. Збирання льону-довгунця на насіння здійснюють у фазі жовтої стиглості або пізніше. Збирання льону-довгунця тільки на насіння здійснюється у випадку, коли не можливо використати його за основним призначенням. Таке може трапитись у випадку затяжної дощової погоди, або/та у випадку малої довжини стебла.

Льон олійний на насіння збирають у фазі жовтої стиглості або у фазі повної стиглості. Для одержання насіння високої якості збирання льону олійного проводять у фазі повної стиглості. Час оптимального збирання настає, коли коробочка шелестить і легко руйнується. У такому випадку складно отримати волокно достатньої якості. Проте, погодні умови впливають також на терміни збирання льону олійного. Це призводить до втрат урожаю насіння.

Погодні умови, біологічний вид, довжина, вміст лубу, розривне навантаження – всі ці ознаки потрібно урахувати, адже вони впливають на технологію переробки і кінцевий результат. Досі використання таких ознак агровиробником мало випадковий характер. Це призводило до втрат урожаю льону й шкоди навколишньому середовищу.

Тому є актуальним і необхідним узагальнення класифікаційних ознак стеблостою та розробка на їх основі концептуальної моделі комплексних технологій переробки стебел льону. Розроблені

технології мають ураховувати сформований у стеблах соломи льону потенціал волокна й дозволяти отримати продукцію різного функціонального призначення.

**Мета дослідження** – теоретично обґрунтувати технології переробки льону в продукцію різного функціонального призначення із урахуванням класифікаційних ознак стеблостою.

### **Матеріали і методи**

Оснoву дослідження становили методи аналізу, синтезу та наукової абстракції. Комплексний підхід дозволив виявити основні характеристики досліджуваних технологій. Технологічні параметри та показники якості сировини льону визначали відповідно до:

- 1) ГОСТ 28285-89 “Солома льняная. Требования при заготовках”;
- 2) ДСТУ 4149:2003 “Треста льняна. Технічні умови”;
- 3) ДСТУ 4015:2001 “Льон тіпаний. Технічні умови”;
- 4) ДСТУ 5015:2008 “Волокно лляне коротке. Технічні умови”.

### **Результати дослідження та обговорення**

На основі проведених раніше досліджень [10 – 13] та інформації в нормативно-технічних документах можна запропонувати класифікацію стеблостою льону і соломи із нього, яка представлена на рис. 1. Згідно схеми на рис. 1. стебла соломи льону можна класифікувати за біологічним видом, фазою стиглості, довжиною жмені, масовою долею лубу, розривним навантаженням. Перші три ознаки класифікації агровиробник ідентифікує ще до початку процесу збирання. Це дає можливість відразу визначити, яку кінцеву продукцію доцільніше отримувати.

Льон-довгунець або льон олійний можна збирати та переробляти, відповідно до погодних умов, у фазі ранньої жовтої стиглості, жовтої стиглості, повної стиглості. Не менш важливою є ознака довжини жмені стебел. Так, відповідно до існуючих вимог [14], можна згрупувати за довжиною льон олійний у три групи, а льон-довгунець в чотири. Для льону олійного граничними значеннями довжини обрано: до 0,5 м, 0,5...0,75 м, вище 0,75 м, для льону-довгунця: до 0,5 м, 0,5...0,75 м, 0,75...0,95 м, вище 0,95 м.

Ці класифікаційні ознаки не потребують застосування спеціальних знань та засобів вимірювання. Відповідно до існуючих вимог до волокна, яке можна використовувати у текстильній промисловості, вміст лубу у стеблі (соломі) повинен бути не меншим за 15%, а розривне навантаження волокна – не меншим за 39,2 Н, тому такі ознаки також введені у класифікацію.

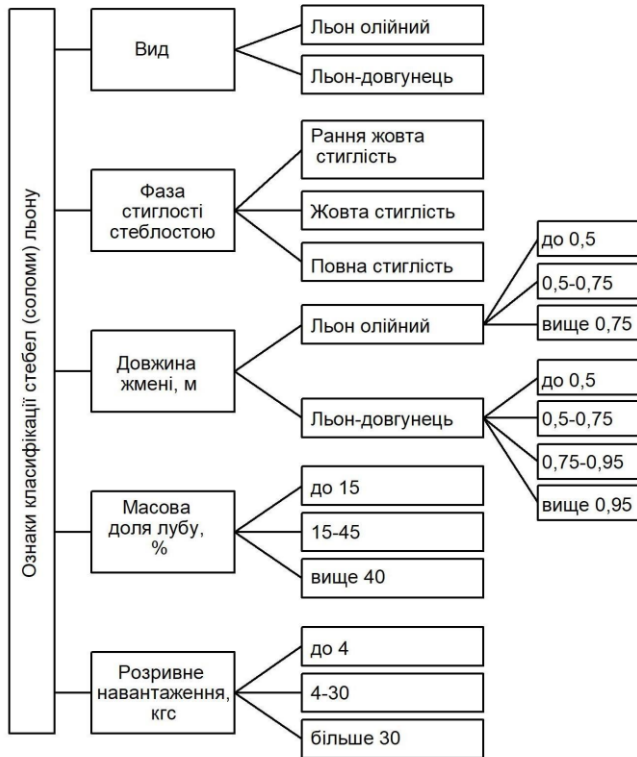


Рис. 1 – Класифікаційні ознаки стебел соломи льону

Запропонована класифікація дає можливість агровиробнику на початковому етапі точно визначити необхідну технологію збирання, переробки, напрями використання продукції переробки та необхідний комплекс механізованих засобів.

На основі запропонованої на рис. 1 класифікації стеблостою (соломи) льону можна обґрунтувати концептуальну модель технологій збирання і переробки СВМ льону в різних кліматичних умовах із урахуванням необхідності максимального використання потенціалу рослини (рис. 2.)

Розглянемо детально порядок операцій за блок-схемою концептуальної моделі на рис. 2. Перш за все, перед початком збирання необхідно визначити середню довжину стеблостою. Відповідно до запропонованої класифікації, якщо встановлена



довжина жмені менша за 0,5 м, незалежно від виду і сорту, льон збирають тільки на насіння, а СВМ льону – переробляють у паливні матеріали. Найбільш виправданим варіантом переробки є руйнування стебел та виготовлення малогабаритних паливних рулонів (МПР) зі СВМ льону. Для спрощення способу формування МПР всі операції можуть виконуватись зернозбиральним комбайном. Це стає можливим за наявності у комбайні пристосування для руйнування (зменшення пружних властивостей) стебел соломи льону, формування МПР зі СВМ льону та транспортера для вивантаження готових рулонів.

У випадку, якщо довжина жмені льону в межах 0,50...0,75 м, то важливого значення набувають умови збирання. Якщо є можливість збирати льон у фазі ранньої жовтої стиглості, то СВМ льону можна застосувати для виготовлення короткого неорієнтованого волокна або паливних брикетів.

Спосіб отримання однотипного волокнистого матеріалу полягає у механічній обробці стебел [15]. Він відрізняється тим, що стеблову частину льону зрізують чи беруть залежно від фази стиглості стеблостою, відділяють насінневу частину та руйнують стебла шляхом механічної обробки, видаляють кострицю, після чого зрілий волокнистий матеріал формують у рулони і транспортують до місця отримання однотипного волокна. Кострицю, що лишається, можна переробити у тверді паливні матеріали – брикети.

Також на блок-схемі, яка відображає концептуальну модель технології переробки стебел соломи та СВМ льону, передбачена переробка за умови довжини жмені в межах 0,75...0,95 м. Така умова характеризує стеблостій, як такий, що може бути перероблений на волокно, якщо виконуються інші умови, а саме збирання відбувається у фазі ранньої жовтої стиглості.

У такому випадку стеблову частину льону зрізують, відділяють насінневу частину та руйнують стебла шляхом механічної обробки.

Зруйновані стебла у фазі ранньої стиглості вкладають у валки для вилежування, після вилежування та дозрівання їх волокнистого матеріалу до фази повної стиглості додатковими технічними засобами здійснюють формування пакунків із наступним транспортуванням їх до місця отримання однотипного волокна.

У фазі ранньої стиглості збирання льону олійного, для спрощення способу отримання однотипного волокнистого матеріалу з льону олійного, усі технологічні операції, окрім формування рулону із валків після вилежування та транспортування їх до місця отримання однотипного волокна, можуть виконуватись зернозбиральним комбайном.



У фазі повної стиглості збирання льону олійного усі технологічні операції можуть виконуватись зернозбиральним комбайном, окрім транспортування рулонів до місця отримання однотипного волокна.

Якщо погодні умови не дозволили провести збирання у фазі ранньої жовтої стиглості або вміст лубу у стебловій масі менший за 15%, то переробка на волокно недоцільна. Тому необхідним стає процес формування малогабаритних паливних рулонів.

Наступною розглядається умова, коли довжина стебла більша 0,95 м. У такому разі є можливість отримання довгого високоякісного волокна за класичною технологією. Для цього є необхідним виконання таких умов: а) сорт льону – льон-довгунець; б) рання жовта або жовта фаза стиглості стебел. Також під час вибору переробної технології варто звертати увагу на вміст лубу. Якщо не виконуються одна із цих умов, то потрібно повернутись до отримання якісного короткого неорієнтованого волокна для різних потреб. Якщо погодні умови призвели до значної втрати якості волокна, то варто повернутись до виготовлення малогабаритних паливних рулонів у польових умовах.

Виконання всіх запропонованих вище умов, а саме, льон-довгунець, із довжиною стеблостою 0,95 м та більше, у фазі ранньої жовтої чи жовтої стиглості із вмістом лубу не меншим за 15 %, дозволяє звернутись під час збирання та переробки до класичної технології брання, розстеляння, вилежування і переробки льонотрести.

### **Висновки**

Із результатів досліджень, відповідно до концептуальної моделі, можна зробити висновок, що найбільш вірогідним є використання варіантів виготовлення короткого неорієнтованого волокна і твердих паливних матеріалів із стебло-волокнистої маси льону після отримання насіння. Тому найбільшу увагу необхідно приділяти технологіям збирання льону з одночасною обробкою стебел і первинною переробкою стебло-волокнистої маси.

Для покращення властивостей, якісних показників й технологічних параметрів стебел соломи, СВМ льону та продукції із них під час збирання та первинного оброблення можна рекомендувати використовувати запропоновану класифікацію стеблостою і блок-схему концептуальної моделі технологій збирання льону із одночасною обробкою стебел і переробкою СВМ для визначення напрямів використання урожаю льону.

На основі запропонованої класифікації та відповідно до концептуальної моделі технологій встановлено, що за довжини жмені

0,5 м, льон збирають тільки на насіння, а СВМ переробляють у МПР. Якщо довжина жмені 0,50...0,75 м у фазі ранньої жовтої стиглості льон збирають для виготовлення короткого неорієнтованого волокна або паливних брикетів. При довжині 0,75...0,95 м та вище у фазі ранньої жовтої стиглості стебла переробляють на волокно. У період збирання за несприятливих погодних умов або при вмісті лубу у стебловій масі менше 15% стебла переробляють у МПР.

Реалізація запропонованої концептуальної моделі технологій переробки стебел соломи льону із урахуванням класифікаційних ознак стеблостою дозволить досягти високої ефективності використання повного біологічного потенціалу льону-довгунця та льону олійного..

### Список посилань

1. Офіційний веб сайт FAOASTAT. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://faostat3.fao.org/downld/>
2. Ягелюк, С. В. Стан ринку льняної сировини в Україні та світі / С. В. Ягелюк // Товарознавчий вісник. – 2016. – Вип. 9. – С. 86–92.
3. Рослинництво України : статистичний збірник. Державна служба статистики України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.org>
4. Онюх, Ю. Особливості вирощування льону олійного в умовах Західного Полісся / Ю. Онюх // Подільський вісник : сільське господарство, техніка, економіка. Сільськогосподарські науки. – 2017. – Вип. 27. – С. 37–43.
5. Ягелюк, С. В. Оцінка якості волокна зі стебел льону олійного, вирощеного в умовах Західного Полісся / С. В. Ягелюк, В. Ф. Дідух, Ю. М. Онюх // Товарознавчий вісник. – 2018. – Вип. 11. – С. 167–173.
6. Ouagne, P. Fibre extraction from oleaginous flax for technical textile applications: influence of pre-processing parameters on fibre extraction yield, size distribution and mechanical properties / P. Ouagne, B. Barthod-Malat, P. Evon, L. Labonne, V. Placet // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 200. – P. 213–220.
7. Berglund, D. R. Flax : New Uses and Demands. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.hort.purdue.edu/newcrop/ncnu02/v5%E2%80%9393358.html>
8. Cappelletto, P. L. Fiber valorization of oilseed flax / P. L. Cappelletto // Flax and other Bast Plants Symposium. – 1997. – Poznan, Poland : Institute of Natural Fibres. – P. 150–151.
9. Ivanovs, S. Impact of the flax fluffing and turning technology upon the quality of flax products / S. Ivanovs, E. Matisans, V. Stramkale //

- Service cooperation in agriculture. Lithuanian university of agriculture research papers. – 1999. – Kaunas-Akademiija. – P. 265–269.
10. Горач, О. О. Удосконалення технології одержання трести з соломи льону олійного з використанням штучного зволоження : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.18.01 “Зберігання і технологія переробки зерна, виготовлення зернових і хлібопекарських виробів та комбікормів” / Горач Ольга Олексіївна; Херсонський національний технічний університет. – Херсон, 2009. – 206 с.
  11. Ордина, Н. А. Оценка качества волокна в льняных стеблях по анатомическим признакам / Н. А. Ордина // Лен и конопля. – 1973. – №6. – С. 29.
  12. Чурсіна, Л. А. Інноваційні технології одержання нетканих та целюлозовмісних матеріалів з льону олійного : монографія / Л. А. Чурсіна, Г. А. Тіхосова, Т. Н. Головенко, І. О. Меняйло-Басиста, під ред. Л. А. Чурсіної. – Херсон, 2014. – 304 с.
  13. Ягелюк, С. В. Визначальні показники якості льоносорівини / С. В. Ягелюк // Товарознавчий вісник. – 2013. – Вип. 6. – С. 153–158.
  14. ГОСТ 14897-69. Солома льняная. Технические условия.
  15. Патент №123407 UA, МПК A01D45/06, D01C1/00. Спосіб отримання однотипного волокнистого матеріалу з льону олійного / Дідух В. Ф., Онюх Ю. М., Ягелюк С. В.; заявл. 18.09.2017; опубл. 26.02.2018; Бюл. №4, 2018 р.

### ***Інформація для авторів та читачів***

*Усі статті, що публікуються у збірнику проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів (подвійне сліпе рецензування).*

*Унікальність текстів публікації перевіряється за допомогою системи пошуку ознак плагіату Unicheck.*

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.*

*Авторські права: за авторами зберігаються усі авторські права та права на видання без обмежень.*

*Збірник дозволяє користувачам: читати, завантажувати, копіювати, поширювати друкувати та посилатися на повні тексти статей за умови зазначення авторства.*

\*\*\*

### ***Information for authors and readers***

*All the articles that are published in the journal must be peer reviewed. It is conducted anonymous both for authors and reviewers (double blind peer review).*

*The uniqueness of the texts of publications is checked with using the Unicheck plagiarism signs search system.*

*The authors take responsibilities for the reliability of stated facts, quotations and others statements.*

*Author's rights: The authors retained all copyrights and publishing rights with no limited publications.*

*The journal allows users: to read, download, copy, distribute type and refer to the whole articles upon conditions of affiliation.*



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

Випуск 44

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ  
“СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ”  
Луцький національний технічний  
університет  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua  
<http://agrmash.info/>  
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32>

JOURNAL OF SCIENTIFIC ARTICLES  
“AGRICULTURAL MACHINES”  
Lutsk National Technical  
University  
75 Lvivska St., Lutsk, 43018, Ukraine  
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua  
<http://agrmash.info/>  
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32>

Відповідальний за випуск: І.М. Дударев  
Комп’ютерна верстка: О.М. Гапонюк

Підписано до друку 07.06.2020 р., формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 10,38. Наклад 100.

Друк ПП Іванюк В.П.  
43021 м. Луцьк, вул. Винниченка, 65  
Свідоцтво Держкомінформу України ВЛН №31 від 04.02.2004 р.

Реєстраційне свідоцтво  
Міністерство юстиції України КВ № 15902-4374 ПР