

ЛУЦЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

ISSN 2307-1699 (Print)  
ISSN 2708-9754 (Online)

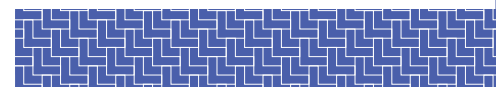
AGRICULTURAL MACHINES

А  
С М М  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ  
МАШИНИ

AGRICULTURAL MACHINES

2023' 49





**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ISSN 2307-1699 (Print)  
ISSN 2708-9754 (Online)



# СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

**Науково-практичне видання**

**Журнал заснований  
у 1995 році**

*У журналі відображені науково-  
практичні проблеми  
сільськогосподарського  
виробництва.*

*Журнал призначений для наукових і  
науково-педагогічних працівників,  
докторантів, аспірантів, а також  
усіх зацікавлених у розвитку  
сільськогосподарського  
виробництва.*

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

**Випуск 49**

**ТЕХНОЛОГІЯ**

\*\*\*

**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС**

\*\*\*

**ТЕХНІКА**

**Луцьк 2023**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Луцького національного технічного університету  
(протокол № 12 від 30.06.2023 р.)*

*Журнал включений до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України,  
технічні науки за спеціальностями  
133 Галузеве машинобудування та 208 Агроінженерія  
(наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 року)*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ № 24919-14859 ПР від 30.06.2021 р.*

### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

#### **Головний редактор:**

Ігор ДУДАРЄВ *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

#### **Заступник головного редактора:**

Володимир ДІДУХ *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

#### **Відповідальний секретар:**

Руслан КІРЧУК *к.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

#### **Члени редакційної колегії:**

Валентин ВЛАДУТ *Ph.D., Національний інститут науково-дослідних розробок машин і установок для сільського господарства та харчової промисловості – INMA, Румунія*

Юрій ГАЙДА *д.с.-г.н., професор, НУ «Чернігівська політехніка», Україна*

Олександр ГЕРАСИМЧУК *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Тетяна ГОЛОВЕНКО *д.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Віктор ЗАХАРЧУК *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

Василь ЗАЯЧУК *к.с.-г.н., доцент, Національний лісотехнічний університет України, Україна*

Олена НАЛОБІНА *д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна*

Світлана ПАНАСЮК *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Лукреція ПОПА *Ph.D., Національний інститут науково-дослідних розробок машин і установок для сільського господарства та харчової промисловості – INMA, Румунія*

Віталій ПУЦЬ *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Луїс РІБЕЙРО *Ph.D., професор, Політехнічний інститут Браганса – IPB, Португалія*

Роман РОГАТИНСЬКИЙ *д.т.н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, Україна*

Ірина ТАРАЙМОВИЧ *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Микола ТОЛСТУШКО *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Наталія ТОЛСТУШКО *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Павло ХОЄЦЬКИЙ *д.с.-г.н., професор, Національний лісотехнічний університет України, Україна*

Віктор ШЕЙЧЕНКО *д.т.н., професор, Полтавський державний аграрний університет, Україна*

Світлана ЯГЕЛЮК *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*



**MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE**

**LUTSK NATIONAL  
TECHNICAL UNIVERSITY**

ISSN 2307-1699 (Print)  
ISSN 2708-9754 (Online)



# AGRICULTURAL MACHINES

**Scientific and Practical Journal**

**Founded in 1995**

*The scientific and practical problems  
of agricultural production are  
presented.*

*The Journal is intended for science  
officers, lectures, PhD students and  
advanced students and for all those  
interested in the development of  
agricultural production.*

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

**Volume 49**

**TECHNOLOGY**

\*\*\*

**TECHNOLOGICAL PROCESS**

\*\*\*

**MACHINERY**

**Lutsk 2023**

UDC 631.3

**Agricultural Machines. Vol. 49. LNTU, Lutsk, 2023. 142 p.**

*Academic Council of Lutsk National Technical University  
confirmed for printing  
(record № 12 dated June, 30, 2023)*

*The Journal is inscribed to the category «Б» of the List of Scientific Professional Publications of Ukraine  
(Technical Sciences by Specialties 133 Industrial Mechanical Engineering, 208 Agricultural Engineering)  
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 № 24919-14859 ПП dated June, 30, 2021*

## **EDITORIAL BOARD**

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

Igor DUDAREV *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

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

Volodymyr DIDUKH *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

### **Executive Editor:**

Ruslan KIRCHUK *Ph.D., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

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

Valentin VLADUT *Ph.D., The National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed for Agriculture and Food Industry – INMA, Romania*  
Yuriy HAYDA *D.Sc., Professor, Chernihiv Polytechnic National University, Ukraine*  
Oleksandr GERASYMCHUK *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Tetiana HOLOVENKO *D.Sc., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Viktor ZAHARCHUK *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Vasyl ZAYACHUK *Ph.D. Assoc. Professor, Ukrainian National Forestry University, Ukraine*  
Olena NALOBINA *D.Sc., Professor, National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine*  
Svitlana PANASYUK *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Lucretia POPA *Ph.D., The National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed for Agriculture and Food Industry – INMA, Romania*  
Vitalii PUTS *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Luis RIBEIRO *Ph.D., Professor, Polytechnic Institute of Bragança – IPB, Portugal*  
Roman ROHATYNSKYI *D.Sc., Professor, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine*  
Iryna TARAYMOVICH *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Mykola TOLSTUSHKO *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Nataliya TOLSTUSHKO *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*  
Pavlo KHOYETSKYY *D.Sc., Professor, Ukrainian National Forestry University, Ukraine*  
Viktor SHEICHENKO *D.Sc., Professor, Poltava State Agrarian University, Ukraine*  
Svitlana YAHELIUK *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

## ЗМІСТ

<b>В.М. Яронуд, Д.А. Дацюк</b> ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ НАСІННЯ У РОЗПОДІЛЬНИКУ ВИСІВНОГО АПАРАТА СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР .....	7
<b>С.М. Мороз, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко</b> ВИКОРИСТАННЯ САД-ПРОГРАМ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН .....	15
<b>І.Є. Цизь, В.Ф. Дідух, О.В. Голій, В.О. Хвесик, В.О. Голій</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ САПРОПЕЛЮ ПРИРОДНОЇ ВОЛОГОСТІ НА УРОЖАЙНІСТЬ СОЇ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ НЕСТАЧІ ВОЛОГИ .....	22
<b>В.Ф. Дідух, Д.С. Альбота, М.В. Бодак</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО ВАЛЬЦЯМИ З ТРАПЕЦІЄПОДІБНИМИ ЗУБЦЯМИ .....	31
<b>О.О. Налобіна, М.В. Голостюк, В.С. Пуць</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ НА ЙОГО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	39
<b>А.В. Шимко, О.З. Бундза, В.Л. Мартинюк</b> ПОШКОДЖЕННЯ БУЛЬБ КАРТОПЛІ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ .....	46
<b>М.І. Фомич</b> ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ .....	53
<b>О.В. Золотовська, Г.В. Теслюк, В.Б. Бойко</b> МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ .....	60
<b>Т.О. Гапонюк, Р.В. Кірчук, Л.Ю. Забродоцька</b> МОДЕЛЮВАННЯ СУШІННЯ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР .....	68
<b>О.П. Герасимчук, О.Л. Ткачук</b> ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ПНЕВМОТЕРМІЧНОЇ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ .....	75
<b>С.М. Юхимчук, М.М. Толстушко, С.Ф. Юхимчук, Л.М. Дацюк</b> РОЗРАХУНОК БРАЛЬНОЇ СЕКЦІЇ ДИСКОВО-ПАСОВОГО ЛЬОНОБРАЛЬНОГО АПАРАТА .....	81
<b>В.С. Кошулько, Ю.О. Чурсінов, Н.А. Сова</b> ВПЛИВ ДИНАМІЧНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ КОЛИВАНЬ РОБОЧОГО СТОЛУ ПАДДІ-МАШИНИ НА СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ .....	90
<b>Ю.О. Ковальчук, О.С. Пушка, А.В. Войтік</b> ЗАСТОСУВАННЯ ЛЕГУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОГЛИНАЮЧИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗМІЦНЕННІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ .....	99
<b>С.М. Хомич, І.Є. Цизь, В.В. Сацюк</b> ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВІДРЕМОНТОВАНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ .....	105
<b>В.В. Сацюк, Р.В. Кірчук, С.М. Хомич</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ПРИ РОБОТІ НА СХИЛАХ .....	111
<b>Н.П. Ковальчук, С.Р. Петрук</b> ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА СТАН ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ УКРАЇНИ .....	117
<b>І.М. Дударєв, С.Ю. Прибиш</b> МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ЗЕРНА ТА НАСІННЯ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕШЕТА СЕПАРАТОРА .....	124
<b>О.О. Ягелюк, В.Ф. Дідух, С.В. Ягелюк</b> ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТЕБЛОСТОЮ ЛЬОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ .....	134

## CONTENT

<b>V. Yaropud, D. Datsiuk</b> STUDY OF SEED MOVEMENT IN DISTRIBUTOR OF SOWING DEVICE OF SELECTION SEEDER OF SMALL SEED CULTURES.....	7
<b>S. Moroz, O. Vasytkovskyi, S. Leshchenko</b> USING CAD SOFTWARE IN DESIGNING AGRICULTURAL MACHINES.....	15
<b>I. Tsiz, V. Didukh, O. Holii, V. Khvesyk, V. Holii</b> STUDY OF THE EFFECT OF SAPROPEL WITH NATURAL MOISTURE CONTENT ON SOYBEAN YIELD UNDER EXTREME MOISTURE SHORTAGE.....	22
<b>V. Didukh, D. Albota, M. Bodak</b> STUDY OF DESTRUCTION PROCESS OF LINSEED STEMS BY ROLLERS WITH TRAPEZOIDAL TEETH.....	31
<b>O. Nalobina, M. Holotiuk, V. Puts</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF SOIL COMPACTION ON ITS MAIN PROPERTIES.....	39
<b>A. Shymko, O. Bundza, V. Martyniuk</b> DAMAGE TO POTATOES DURING TRANSPORTATION.....	46
<b>M. Fomych</b> TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MANUFACTURING FUEL BRIQUETTES.....	53
<b>O. Zolotovska, H. Tesliuk, V. Boiko</b> MODELING THE TEMPERATURE FIELD IN THE SOIL MASSIF.....	60
<b>T. Haponiuk, R. Kirchuk, L. Zabrodotska</b> MODELING OF OIL CROP SEED DRYING.....	68
<b>A. Herasymchuk, O. Tkachuk</b> JUSTIFICATION OF OPERATING MODES FOR PNEUMOTHERMAL MOBILE EQUIPMENT FOR SEPARATION OF SCOTS PINE NEEDLES.....	75
<b>S.M. Yukhymchuk, S.F. Yuhymchuk, M. Tolstushko, L. Datsyuk</b> CALCULATION OF PULLING SECTION OF DISC-BELT FLAX-PULLING DEVICE.....	81
<b>V. Koshul'ko, Y. Chursinov, N. Sova</b> INFLUENCE OF DYNAMIC IRREGULARITY OF PADDY MACHINE WORKTABLE OSCILLATIONS ON GRAIN MIXTURE SEPARATION.....	90
<b>Y. Kovalchuk, O. Pushka, A. Voitik</b> APPLICATION OF ALLOYING MATERIALS AND ABSORBING COATINGS IN LASER STRENGTHENING OF ROAD TRANSPORT DETAILS.....	99
<b>S. Khomych, I. Tsiz, V. Satsiuk</b> PREDICTION OF SERVICE LIFE OF REPAIRED PART SURFACE.....	105
<b>V. Satsiuk, R. Kirchuk, S. Khomych</b> STUDY OF THE POSITIONING ACCURACY OF MACHINE-TRACTOR UNITS FOR WORKING ON SLOPES.....	111
<b>N. Kovalchuk, S. Petruk</b> PECULIARITIES OF ENVIRONMENTAL INFLUENCE ON THE CONDITION OF FOREST PLANTATIONS IN UKRAINE.....	117
<b>I. Dudarev, S. Prybysh</b> MODELING OF GRAIN AND SEED SHAPE TO SUBSTANTIATE OF SEED CLEANER SIEVE PARAMETERS.....	124
<b>O. Yaheliuk, V. Didukh, S. Yaheliuk</b> FLAX STEM QUALITY ASSESSMENT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES.....	134

## STUDY OF SEED MOVEMENT IN DISTRIBUTOR OF SOWING DEVICE OF SELECTION SEEDER OF SMALL SEED CULTURES

V. Yaropud\*, D. Datsiuk

Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, Ukraine

---



### ABSTRACT

*Sowing method depends on the soil and climatic conditions and the sowing qualities of the seeds of small-seeded crops. The task of sowing is to create favorable conditions for the germination of the seeds and to ensure their required density with uniform placement in the rows. The sowing device is one of the most important working body of the seeder. It ensures the selection of a certain number of seeds from the seed mass and the formation of an output seed flow with the specified parameters. Therefore, the seeder efficiency is characterized by the uniformity of seed distribution in the row and on the sown field. During the sowing of small-seeded crops, electromechanical seeders are used in the fields of variety testing and preliminary propagation. However, the disadvantage of their work is the insufficient uniformity of seed distribution along the row, which is caused by the action of random factors during sowing. The result is an uneven crop, with thicker or thinner plants in the row, which reduces the yield of small-seeded crops of breeding value. In order to ensure high accuracy of seed sowing by selection seeder of small-seeded crops, it is necessary to install a seed guide in the form of a chute in the distributor of the sowing device. On the basis of the numerical simulation results of the seed movement in the distributor of the seeding device of the selection seeder, the equations were obtained that characterize the dependence of the throughput capacity of the sowing device and the coefficient of variation of the throughput capacity of the sowing device on the throughput capacity of the dispenser, the angle of the flow narrowing and the angle of inclination of the guide. The analysis of the obtained equations showed that in order to ensure the rational parameters of the proposed distributor guide of the sowing device, it is necessary that the coefficient of variation of the throughput of the sowing device would be minimal, and the throughput of the sowing device would be maximal.*

#### **Key words:**

seeder,  
sowing device,  
seeds of small-seeded crops,  
distributor guide of sowing device,  
throughput of sowing device

#### **Article history:**

Received 17.02.2023

Accepted 30.05.2023

#### **\*Corresponding author:**

yaropud77@gmail.com

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.945

#### **To cite this article:**

Yaropud, V., & Datsiuk, D. (2023). Study of seed movement in distributor of sowing device of selection seeder of small seed cultures. *Agricultural Machines*, 49, 7-14. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.945>



УДК 631.331

**ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ НАСІННЯ У РОЗПОДІЛЬНИКУ ВИСІВНОГО АПАРАТА СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР****В.М. Яропуд\*, Д.А. Дацюк***Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна***АНОТАЦІЯ**

Спосіб сівби насіння дрібнонасінних культур залежить від ґрунтово-кліматичних умов і посівних якостей насіння. Сівба має забезпечити створення сприятливих умов для проростання насіння та необхідну густоту посівів за рівномірного розташування рослин у рядках. Висівний апарат є одним із найважливіших робочих органів сівалки. Він забезпечує відбирання із загальної маси певної кількості насіння та формування вихідного потоку насіння із заданими параметрами. Тому ефективність роботи висівних апаратів характеризується рівномірністю розподілення насіння в рядку та на засіяному полі. Під час сівби дрібнонасінних культур на ділянках сортовипробування і попереднього розмноження використовуються електромеханічні сівалки. Однак, недоліком їх роботи є недостатня рівномірність розподілення насіння вздовж рядка, що спричинена дією випадкових факторів під час висіву. Внаслідок цього посіви виходять нерівномірними – із загушенням або розрідженням рослин у рядку, що спричиняє зниження урожайності селекційноцінних дрібнонасінних культур. Для забезпечення високої точності висіву насіння селекційними сівалками дрібнонасінних культур необхідно у розподільник висівного апарата встановлювати спрямовувач насіння, який має форму жолоба. За результатами чисельного моделювання руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур отримано залежності пропускної здатності висівного апарата та коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарата від пропускної здатності дозатора, кута звуження потоку та кута нахилу спрямовувача. Аналіз отриманих рівнянь показав, що для забезпечення раціональних параметрів спрямовувача розподільника висівного апарата необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата був мінімальним, а пропускна здатність висівного апарата була максимальною.

**Ключові слова:**

сівалка,  
висівний апарат,  
насіння дрібнонасінних культур,  
спрямовувач розподільника висівного апарата,  
пропускна здатність висівного апарата

**Історія публікації:**

Отримано 17.02.2023

Затверджено 30.05.2023

**\*Автор для листування:**

yaropud77@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.945

**Цитувати цю статтю:**

Яропуд, В. М., & Дацюк, Д. А. (2023). Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур. *Сільськогосподарські машини*, 49, 7-14. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.945>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Висів – це важливий етап селекційного виробництва насіння дрібнонасінних культур. Це пояснюється необхідністю отримання високоякісних посівів на початковій стадії дослідження та попереднього розмноження нових сортів і гібридів дрібнонасінних культур (Shepelev et al., 2016; Shackley et al., 2019; Молоцький та ін., 2006; Васильківський & Кочмарський, 2016; Калетнік та ін., 2020).

Висівний апарат – це один із найбільш важливих робочих органів сівалки. Він призначений для відбирання із загальної маси насіння певної кількості насінин і формування їх вихідного потоку із заданими параметрами (Shevchenko & Aliiev, 2018). Тому від роботи висівних апаратів сівалок залежить якість розподілу насіння в рядках та в цілому на засіяному полі.

Для висіву дрібнонасінних культур на ділянках сортовипробування та попереднього розмноження застосовують електромеханічні сівалки (Яропуд та ін., 2021). Однак, вони не забезпечують рівномірного розподілу насіння вздовж рядків, що зумовлено негативним впливом випадкових факторів під час висіву. Як наслідок, посіви є нерівномірними – із загушенням або розрідженням рослин у рядку, що, у свою чергу, зумовлює зниження урожайності селекційноцінних дрібнонасінних культур.

Процес висіву дрібнонасінних культур за допомогою електромеханічного висівного апарата полягає у дозуванні і транспортуванні насіння до насіннепроводу (Яропуд та ін., 2021). У сівалках з електромеханічним висівним апаратом насіння завантажується до місткості висівного апарата, де випадковим чином розташовується (випадкове пакування). Із місткості висівного апарата, через дозуючі отвори, насіння надходить до розподільників і переміщується до насіннепроводу.

Сучасні теоретичні дослідження механіко-технологічних процесів, зокрема процесу переміщення насінин внаслідок дії робочих органів технічних засобів, зводяться до аналітичних методів. Внаслідок застосування цих методів отримують складні системи диференціальних рівнянь із граничними та початковими умовами (Aliiev et al., 2018a; Aliiev et al., 2018b). Як правило, ці системи рівнянь не мають розв'язку традиційними методами,

тому виникає необхідність в їх чисельному розв'язуванні із використанням методів комп'ютерного моделювання.

Отже, дослідження, що спрямовані на удосконалення процесу дозування насіння висівними апаратами селекційних сівалок, мають важливе наукове та практичне значення.

**Мета дослідження** – обґрунтування раціональних параметрів спрямовувача розподільника висівного апарата селекційної сівалки для підвищення точності висіву насіння дрібнонасінних культур.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Спрямовувач у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки виконано у формі жолоба, яким рухаються насінини (рис. 1) (Дацюк та ін., 2021). Основним завданням аналітичних досліджень є визначення кута нахилу  $\beta$  та кута звуження потоку  $\gamma$  (кут між двома твірними спрямовувача) спрямовувача, за яких пропускна здатність висівного апарата селекційної сівалки  $Q_d'$  є рівномірною, тобто коефіцієнт варіації пропускної здатності  $\Delta(Q_d')$  досягає мінімального значення:

$$\Delta(Q_d') = \frac{\sigma(Q_d')}{Q_d'}, \quad (1)$$

де  $\Delta(Q_d')$  – коефіцієнт варіації пропускної здатності  $Q_d'$  висівного апарата;  $\sigma(Q_d')$  – середньоквадратичне відхилення пропускної здатності  $Q_d'$  висівного апарата селекційної сівалки, шт(насінин)/с;  $\overline{Q_d'}$  – середнє значення пропускної здатності  $Q_d'$  висівного апарата селекційної сівалки, шт/с.

Для проведення дослідження руху насіння дрібнонасінних культур у розподільнику висівного апарата сівалки використані методи чисельного моделювання з програмного пакету STAR-CCM+ (Яропуд et al., 2022; Яропуд & Дацюк, 2021; Яропуд та ін., 2021). Фактори досліджень та їх рівні подані в **таблиці 1**. Найменше значення кутів  $\beta$  та  $\gamma$  вибиралося із урахуванням, що насіння має рухатися похилою площиною без утворення грудок:  $\beta_{\min} = \gamma_{\min} = \arctg(k) = \arctg(0,58) = 0,525$  (де  $k$  – коефіцієнт тертя-спокою насіння поверхнею спрямовувача). План досліджень – повнофакторний з кількістю дослідів –  $3^3 = 27$ .

Кількість повторень кожного дослідження – три. Розраховані середні значення  $Q_d'$  і  $\Delta(Q_d')$  також подані в таблиці 1.

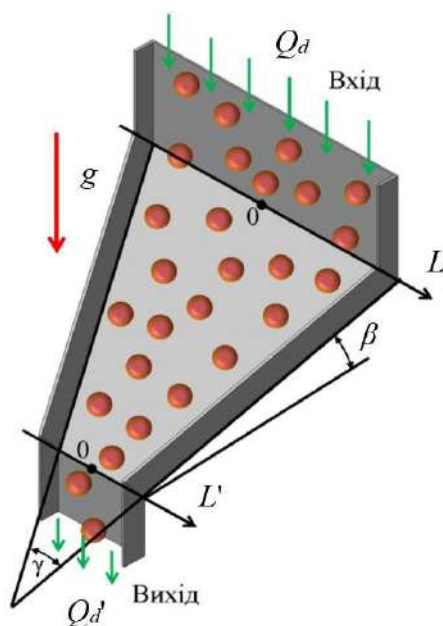


Рис. 1 – Моделювання руху насіння у розподільнику висівного апарата

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Візуалізація моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарата подана на рис. 2–4. Аналіз отриманих даних дозволяє стверджувати, що зменшення середньої пропускної здатності висівного апарата  $Q_d'$  порівняно з пропускною здатністю дозатора  $Q_d$  та збільшення її рівномірності відбувається внаслідок зменшення коефіцієнта варіації  $\Delta(Q_d')$ . Результати досліджень подані у таблиці 1. За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica отримано рівняння пропускної здатності висівного апарата  $Q_d'$  з кодованими факторами:

$$Q_d' = 43,1321 + 26,2741x_1 + 0,0259259x_1^2 + 2,87099x_2 + 1,85926x_1x_2 - 1,4537x_2^2 + 11,7327x_3 + 7,77593x_1x_3 - 0,0277778x_2x_3 - 3,87593x_3^2, \quad (2)$$

де  $x_1$  – кодоване значення пропускної здатності дозатора;  $x_2$  – кодоване значення кута  $\beta$ ;  $x_3$  – кодоване значення кута  $\gamma$ .

Таблиця 1 – Результати дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарата

№ п/п	Пропускна здатність дозатора $Q_d$ , шт/с	Кут звуження потоку $\gamma$ , рад	Кут нахилу $\beta$ , рад	Пропускна здатність висівного апарата $Q_d'$ , шт/с				Коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата $\Delta(Q_d')$			
				1	2	3	середнє	1	2	3	середнє
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	20	0,524	0,524	7,9	7,9	7,4	7,7	0,61	0,58	0,57	0,59
2	20	0,524	0,785	13,4	13,3	12,5	13,1	0,67	0,60	0,60	0,62
3	20	0,524	1,047	15,7	15,9	15,3	15,6	0,84	0,79	0,81	0,81
4	20	0,785	0,524	9,4	9,6	8,7	9,2	0,65	0,58	0,59	0,61
5	20	0,785	0,785	15,0	14,8	14,2	14,7	0,71	0,62	0,66	0,66
6	20	0,785	1,047	17,7	17,0	16,8	17,2	0,91	0,85	0,85	0,87
7	20	1,047	0,524	10,1	9,9	9,5	9,8	0,74	0,68	0,70	0,71
8	20	1,047	0,785	15,3	15,2	14,4	15,0	0,78	0,71	0,71	0,73
9	20	1,047	1,047	18,1	17,9	17,1	17,7	0,98	0,89	0,91	0,93
10	60	0,524	0,524	23,6	23,4	22,7	23,2	0,63	0,57	0,56	0,59
11	60	0,524	0,785	38,9	38,9	38,3	38,7	0,65	0,62	0,60	0,62
12	60	0,524	1,047	47,3	46,8	46,3	46,8	0,88	0,80	0,81	0,83
13	60	0,785	0,524	28,0	27,4	27,0	27,5	0,67	0,62	0,60	0,63
14	60	0,785	0,785	43,4	43,3	42,6	43,1	0,70	0,63	0,64	0,66
15	60	0,785	1,047	51,5	50,8	50,6	51,0	0,91	0,85	0,85	0,87
16	60	1,047	0,524	29,3	29,2	28,6	29,0	0,74	0,67	0,69	0,70

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	60	1,047	0,785	44,7	44,5	44,2	44,5	0,77	0,74	0,73	0,75
18	60	1,047	1,047	52,7	52,5	52,1	52,4	0,97	0,91	0,93	0,94
19	100	0,524	0,524	39,2	38,6	38,2	38,7	0,64	0,59	0,57	0,60
20	100	0,524	0,785	64,8	64,7	64,4	64,6	0,66	0,62	0,63	0,64
21	100	0,524	1,047	78,2	77,8	77,2	77,7	0,87	0,80	0,80	0,82
22	100	0,785	0,524	46,3	45,9	45,4	45,9	0,68	0,59	0,62	0,63
23	100	0,785	0,785	71,8	72,0	71,4	71,7	0,69	0,62	0,66	0,66
24	100	0,785	1,047	85,2	85,0	84,4	84,9	0,90	0,81	0,85	0,85
25	100	1,047	0,524	48,2	48,3	47,8	48,1	0,72	0,68	0,69	0,70
26	100	1,047	0,785	74,8	74,1	73,9	74,3	0,80	0,74	0,74	0,76
27	100	1,047	1,047	87,3	87,1	86,7	87,0	0,96	0,93	0,91	0,93

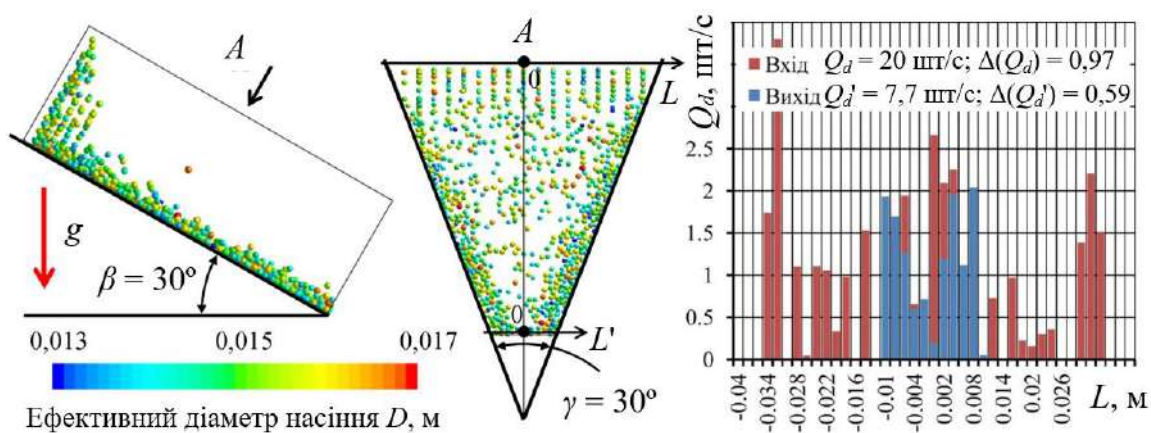


Рис. 2 – Візуалізація результатів чисельного моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарата (дослід № 1, таблиця 1)

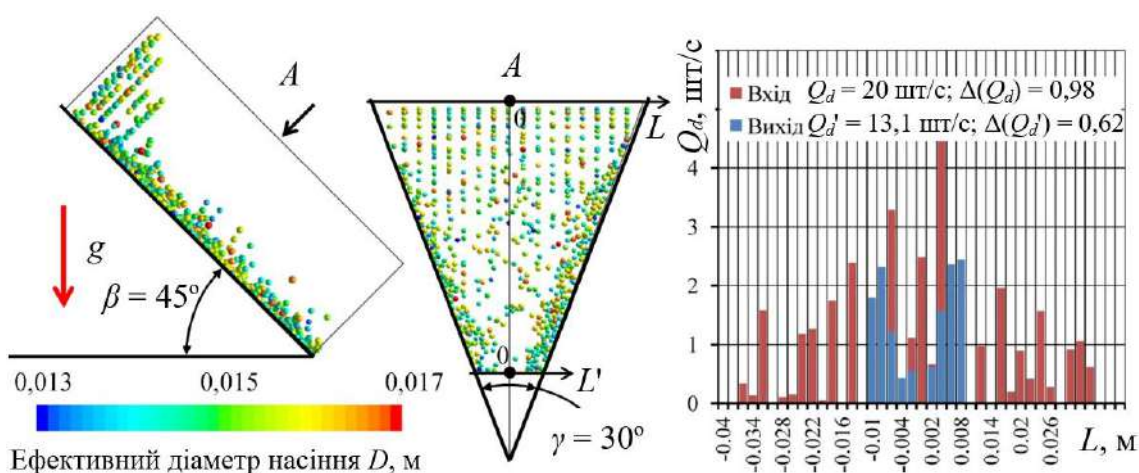


Рис. 3 – Візуалізація результатів чисельного моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарата (дослід № 2, таблиця 1)

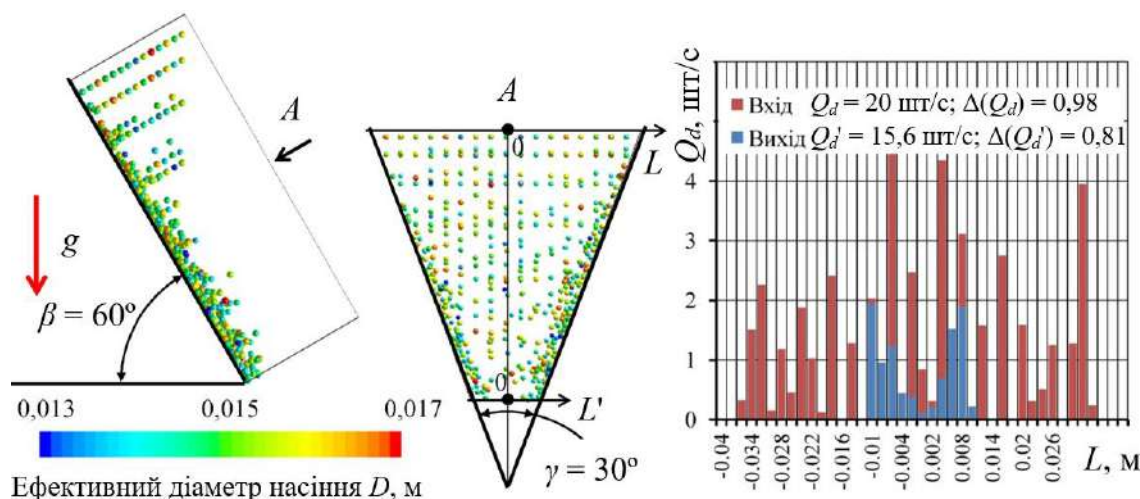


Рис. 4 – Візуалізація результатів чисельного моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарата (дослід № 3, таблиця 1)

Результати статистичного оброблення рівняння (2) подані в таблиці 2. Ураховуючи табличне значення критерію Стьюдента  $t(0,05;54) = 2$ , отримано рівняння пропускної здатності висівного апарата сівалки  $Q_d'$  з натуральними факторами (рис. 5):

$$Q_d' = -44,5759 - 0,0648676Q_d + 33,5619\beta + 0,17741Q_d\beta - 21,1774\beta^2 + 88,9114\gamma + 0,741978Q_d\gamma - 56,4642\gamma^2. \quad (3)$$

Аналіз графіків на рис. 5 показує, що із збільшенням пропускної здатності дозатора  $Q_d$ , кута звуження потоку  $\gamma$  та кута нахилу спрямовувача  $\beta$  пропускна здатність висівного апарата  $Q_d'$  збільшується. За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica отримано рівняння регресії для коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  з кодованими факторами:

$$\Delta(Q_d') = 0,664815 + 0,00333333x_1 - 0,00222222x_1^2 + 0,0564815x_2 - 0,00111111x_1x_2 + 0,0216667x_2^2 + 0,117407x_3 - 0,00222222x_1x_3 + 9,61481 \cdot 10^{-17}x_2x_3 + 0,0777778x_3^2. \quad (4)$$

Результати статистичного оброблення рівняння (4) подані в таблиці 3. Ураховуючи табличне значення критерію Стьюдента  $t(0,05;54) = 2$ , отримано рівняння коефіцієнта

варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  з натуральними факторами (рис. 6):

$$\Delta(Q_d') = 1,03654 - 0,279974\beta + 0,315638\beta^2 - 1,33078\gamma + 1,13306\gamma^2. \quad (5)$$

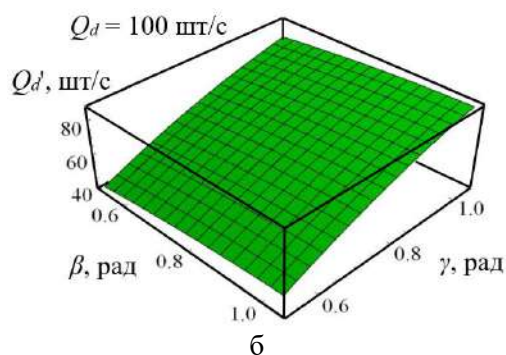
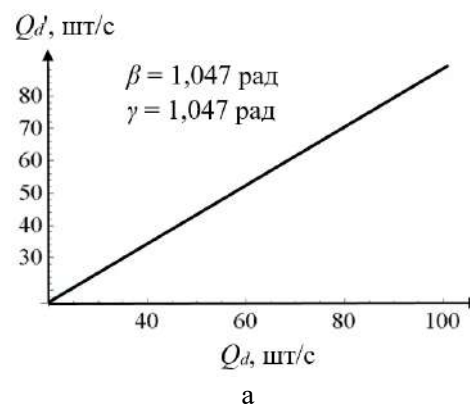


Рис. 5 – Графічні залежності пропускної здатності висівного апарата  $Q_d'$  від пропускної здатності дозатора  $Q_d$  (а) та від кутів  $\gamma$  й  $\beta$  (б)



Таблиця 2 – Результати статистичного оброблення рівняння (2)

Коефіцієнт рівняння (2)	Значення коефіцієнтів рівняння (2)	Критерій Стьюдента
1	2	3
$a_0$	43,1321	63,3971
$a_1$	26,2741	83,4256
$a_2$	2,87099	9,11598
$a_3$	11,7327	37,2538
$a_{12}$	1,85926	4,82021
$a_{13}$	7,77593	20,1594
$a_{23}$	- 0,0277778	- 0,0720152
$a_{11}$	0,0259259	0,0475276
$a_{22}$	- 1,4537	- 2,66494
$a_{33}$	- 3,87593	- 7,10537

Таблиця 3 – Результати статистичного оброблення рівняння (4)

Коефіцієнт рівняння (4)	Значення коефіцієнтів рівняння (4)	Критерій Стьюдента
1	2	3
$a_0$	0,664815	141,526
$a_1$	0,00333333	1,53292
$a_2$	0,0564815	25,9744
$a_3$	0,117407	53,9927
$a_{12}$	- 0,00111111	-0,417207
$a_{13}$	- 0,00222222	-0,834413
$a_{23}$	$9,61481 \cdot 10^{-17}$	$3,61023 \cdot 10^{-14}$
$a_{11}$	- 0,00222222	- 0,590019
$a_{22}$	0,0216667	5,75269
$a_{33}$	0,0777778	20,6507

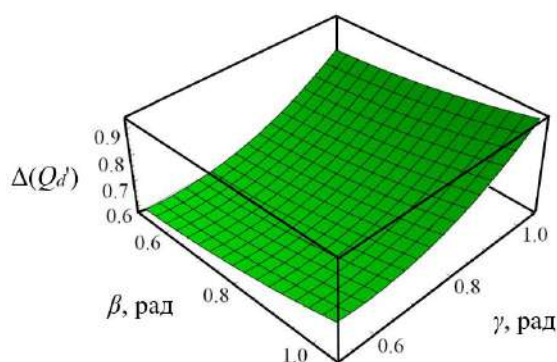


Рис. 6 – Поверхня відгуку коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  залежно від кутів  $\gamma$  та  $\beta$

Аналіз графіка на рис. 6 показує, що із збільшенням кута звуження потоку  $\gamma$  та кута

нахилу спрямовувача  $\beta$  коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  збільшується. Пропускна здатність дозатора  $Q_d$  не впливає на  $\Delta(Q_d')$ .

Для забезпечення раціональних параметрів спрямовувача розподільника висівного апарата необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  був мінімальним, а пропускна здатність висівного апарата  $Q_d'$  – максимальною, тобто:

$$\left. \begin{aligned} \Delta(Q_d') &\rightarrow \min; \\ Q_d' &\rightarrow \max; \\ 20 &\leq Q_d \leq 100; \\ 0,524 &\leq \beta \leq 1,047; \\ 0,524 &\leq \gamma \leq 1,047. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6), ураховуючи рівняння (5), отримаємо для будь-якого  $Q_d$ :  $\beta = 0,7328$  рад ( $42^\circ$ ),  $\gamma = 0,785$  рад ( $45^\circ$ ). За цих значень  $\beta$  і  $\gamma$  коефіцієнт варіації пропускної здатності апарата  $\Delta(Q_d')$  = 0,65, що у 1,5 рази більший за значення коефіцієнта варіації пропускної здатності дозатора  $\Delta(Q_d)$ . Отже, результати дозволяють стверджувати, що розроблений висівний апарат забезпечує підвищення точності висіву.

### ВИСНОВКИ

Для забезпечення високої точності висіву у розподільнику висівного апарата необхідно встановлювати спрямовувач насіння, який має форму жолоба. За результатами чисельного моделювання руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур отримано залежності пропускної здатності висівного апарата  $Q_d'$  та коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  від пропускної здатності дозатора  $Q_d$ , кута звуження потоку  $\gamma$  та кута нахилу спрямовувача  $\beta$ . Внаслідок аналізу отриманих рівнянь встановлено, що для забезпечення раціональних параметрів запропонованого спрямовувача розподільника висівного апарата необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  був мінімальним, а пропускна здатність  $Q_d'$  – максимальною. Розв'язання системи рівнянь (6), ураховуючи рівняння (3) та (5), дозволило отримати для будь-якого  $Q_d$ :  $\beta = 0,7328$  рад ( $42^\circ$ ),  $\gamma = 0,785$  рад ( $45^\circ$ ). За цих значень коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата  $\Delta(Q_d')$  в 1,5 рази більший за коефіцієнт варіації пропускної здатності дозатора  $\Delta(Q_d)$ , що вказує на підвищення точності висіву висівного апарата.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., & Trukhanska, O. O. (2018a). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54(1), 95-104.
- Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., & Ivlev, V. V. (2018b). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 56(3), 119-128.
- Shackley, B., Paynter, B., Troup, G., Bucat, J., Seymour, M., & Blake, A. (2019). *2020 Western Australian Crop Sowing Guide*. Grains Research and Development Corporation.
- Shepelev, S., Shepelev, V., & Almetova, Z. (2016). Optimization of technical equipment for crop sowing processes. *Procedia Engineering*, 150, 1258-1262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.142>
- Shevchenko, I. & Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4), 135-142.
- Yaropud, V., Honcharuk, I., Datsiuk, D., & Aliiev, E. (2022). The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus*, 33(1), 199-208. <https://dx.doi.org/10.15159/jas.22.08>
- Васильківський, С. П., & Кочмарський, В. С. (2016). *Селекція і насінництво польових культур (Breeding and seed production of field crops)*. Біла Церква.
- Дацюк, Д. А., Яропуд, В. М., & Алієв, Е. Б. (2021). Патент України 149682. *Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур (Seeding device of the selection seeder of small-seeded crops)*. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
- Калетнік, Г. М., Мазур, В. А., Браніцький, Ю. Ю., & Мазур, О. В. (2020). *Оптимізація технологічних прийомів вирощування проса лозовидного (світчграс) для умов Лісостепу правобережного (Optimization of technological methods of growing vine-like millet (switchgrass) for the conditions of the Right-bank Forest-steppe)*. Вінниця: Видавництво ТОВ «Друк».
- Молоцький, М. Я., Васильківський, С. П., Князюк, В. І., & Власенко, В. А. (2006). *Селекція і насінництво сільськогосподарських рослин (Breeding and seed production of agricultural plants)*. Київ: Вища освіта.
- Яропуд, В. М., Алієв, Е. Б., & Дацюк, Д. А. (2021). Методика чисельного моделювання висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур (*Methods of numerical modeling of sowing apparatus of selection seeder of small-seed crops*). *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, 12(3), 121-127.
- Яропуд, В. М., & Дацюк, Д. А. (2021). Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур (*By improving breeding seeder sowing device small seeded crops*). *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(100), 152-166. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-1-15>

## USING CAD SOFTWARE IN DESIGNING AGRICULTURAL MACHINES

S. Moroz\*, O. Vasylovskiy, S. Leshchenko

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

---



### ABSTRACT

*IT technologies are increasingly used in various industries. The rapid development of IT technologies makes it possible to use them in places where they were unimaginable yesterday. They are used not only in scientific research and leading industries, but also in such conservative ones as agriculture. Computer systems are used on modern models of agricultural machines and equipment. With each new model, their coverage of the number of working bodies and processes expands. Therefore, the manual work of the service personnel is transferred to the work of control and correction. This has a positive effect on the development of machinery for agricultural production. The introduction of the latest technologies not only improves their quality, but also speeds up the process of creating new models. In order to reduce the time from development to production of series agricultural machines, manufacturers use not only modern production technologies. They also implement and use modern computer software – CAD software, which are not only used to design new equipment. They also make it possible to research the reliability of equipment and its working bodies even at the development stage, without the need for lengthy tests in real working conditions. To do this, manufacturers need specialists who are either able to use such computer software immediately or who can learn it in a short time and use it in their professional activities. The purpose of the research is to develop a methodology for designing models of working bodies, such as cultivator paw, and assemblies of working bodies of machines using SolidWorks software. The article discusses the use of modern CAD software in the design of agricultural machines using the SolidWorks program as an example. As an example, the model of the universal arrow paw of the cultivator is taken. The CAD software makes it possible to optimize the structure by predetermining its dangerous zones.*

#### **Key words:**

CAD software,  
SolidWorks,  
SolidWorks Simulation,  
3D-model,  
cultivator paw model

#### **Article history:**

Received 23.03.2023  
Accepted 30.05.2023

#### **\*Corresponding author:**

serhii\_moroz@ukr.net

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1010

#### **To cite this article:**

Moroz, S., Vasylovskiy, O., & Leshchenko, S. (2023). Using CAD software in designing agricultural machines. *Agricultural Machines*, 49, 15-21. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1010>



УДК 004.921:631.316.022

**ВИКОРИСТАННЯ CAD-ПРОГРАМ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН****С.М. Мороз\*, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко***Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна***АНОТАЦІЯ**

Інформаційні технології все частіше використовуються в різних галузях виробництва. Бурхливий розвиток ІТ-технологій дозволяє впроваджувати їх там, де вчора це й не мріяли. Їх використовують не лише в наукових дослідженнях та провідних галузях, але й в таких консервативних як сільське господарство. Комп'ютерні системи використовуються на сучасних моделях сільськогосподарської техніки та обладнання. З кожною новою моделлю розширюється охоплення ними кількості робочих органів та процесів. Отже, ручна праця персоналу, що обслуговує техніку, переводиться на роботу з контролю та корегування. Це, своєю чергою, позитивно впливає на розвиток техніки для агровиробництва. Впровадження новітніх технологій покращує не тільки її якість, але й прискорює процеси створення нових зразків. Для скорочення тривалості періоду від розроблення до випуску серійних машин виробники використовують не лише сучасні технології виробництва. Вони також впроваджують та використовують сучасне програмне забезпечення – CAD-програми, призначення яких полягає не лише в проєктуванні нової техніки. Також вони дозволяють проводити дослідження надійності техніки та її робочих органів ще на стадії розроблення без потреби тривалих випробувань в реальних умовах роботи. Для цього виробники мають потребу у фахівцях, які здатні або одразу використовувати таке комп'ютерне програмне забезпечення, або здатні у короткий термін його освоїти та використовувати у своїй професійній діяльності. У статті розглянуто використання сучасних комп'ютерних CAD-програм при конструюванні сільськогосподарських машин на прикладі використання програми SolidWorks. За приклад для розроблення та дослідження вибрано модель універсальної стріччатої лапи культиватора. Комп'ютерна програма дозволяє провести оптимізацію конструкції лапи культиватора, попередньо визначивши її небезпечні зони.

**Ключові слова:**

CAD-програми,  
SolidWorks,  
SolidWorks Simulation,  
3D-модель,  
модель лапи культиватора

**Історія публікації:**

Отримано 23.03.2023  
Затверджено 30.05.2023

**\*Автор для листування:**

serhii\_moroz@ukr.net

**DOI:** 10.36910/acm.vi49.1010**Цитувати цю статтю:**

Мороз, С. М., Васильковський, О. М., & Лещенко, С. М. (2023). Використання CAD-програм при проєктуванні сільськогосподарських машин. *Сільськогосподарські машини*, 49, 15-21. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1010>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У різних галузях машинобудування для проектування машин широко використовується сучасне комп'ютерне програмне забезпечення. Виробникам сільськогосподарської техніки потрібні висококваліфіковані фахівці, які мають знання не лише як створювати конструкції машин і обладнання, але й вміють використовувати сучасні CAD-програми. Сучасний рівень розвитку CAD-програм дозволяє створювати 3D-моделі та креслення розроблених деталей, вузлів і конструкцій машин (Tickoo, 2017; Verna & Weber, 2019a; Tickoo, 2020; Keska, 2021), а також проводити дослідження конструкцій машин з метою встановлення їх конструктивних недоліків та удосконалювати їх ще на стадії розроблення (Weber & Verna, 2016; Verna & Weber, 2019b; Трикін та ін., 2019). Крім того, сучасні CAD-програми забезпечують супровід розробленої техніки від створення моделей до виведення з експлуатації машин (PLM). Деякі програми дозволяють розробляти способи та технології утилізації виведеної з експлуатації техніки.

**Мета дослідження** – розроблення методології створення моделей деталей та складань робочих органів машин на прикладі культиваторної лапи в середовищі SolidWorks з використанням його додатків.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Використовувався досвід роботи з CAD-програмами та рекомендовані методики визначення міцності та величини деформації під дією зовнішнього навантаження та сил внутрішнього опору.

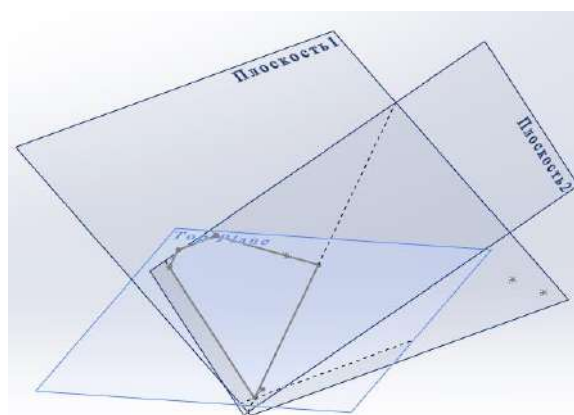
## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Виробники сільськогосподарської техніки переходять на випуск сучасних машин та обладнання, що є високотехнологічними. Для досягнення високої продуктивності та якості їхньої роботи використовується сучасне програмне забезпечення, яке дозволяє забезпечити оперативну передачу інформації для виготовлення деталей на металообробних верстатах. Таким комп'ютерним програмним забезпеченням є спеціалізовані CAD-програми.

Для прикладу, розглянемо один із найпростіших за конструкцією робочих органів

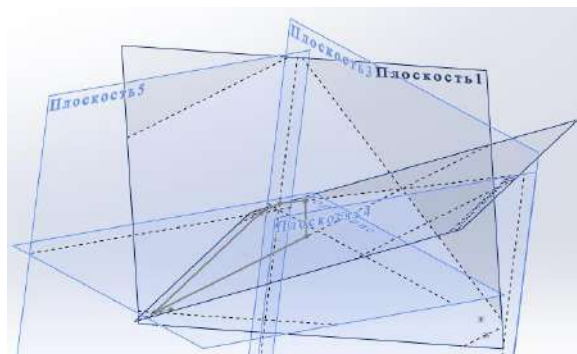
– культиваторну лапу (Василенко & Бабий, 1961; Хайлис, 1992; Заїка, 2001; Сисолін та ін., 2001; Сисолін та ін., 2002; Войтюк та ін., 2005), що містить універсальну стрілочасту лапу, стояк та кріпильні елементи (болти, гайки та шайби).

Визначимо послідовність побудови моделі стрілочатої лапи із хвостовиком та її стояка. Для побудови моделі використовуються допоміжні площини та осі. Для побудови грудей та крил стрілочатої лапи за базову поверхню приймаємо площину Зверху (Сверху). Додаткові площини Площина 1 (Плоскость 1) та Площина 2 (Плоскость 2) (рис. 1) використовуються для побудови грудей та крил лапи культиватора.



**Рис. 1** – Базова площина побудови моделі та допоміжні площини для побудови грудей й крил лапи культиватора

Додаткові площини Площина 3 (Плоскость 3), Площина 4 (Плоскость 4) та Площина 5 (Плоскость 5) (рис. 2) використовуються для обмеження ширини захвату та довжини моделі лапи.



**Рис. 2** – Площини, що обмежують ширину захвату та довжину моделі лапи культиватора

Створюємо додаткові напрямні осі Вісь 1 – Вісь 5 (*Ось 1 – Ось 5*) (рис. 3), які утворюються в місцях перетину допоміжних площин між собою та з базовою поверхнею.

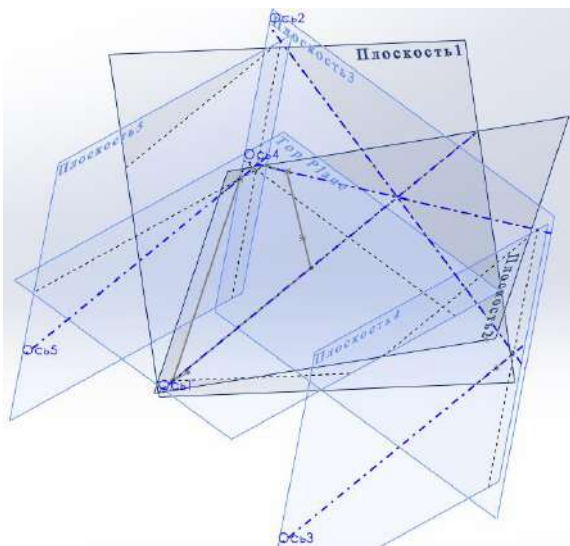


Рис. 3 – Допоміжні осі

Будуємо профілі грудей та крил моделі лапи на площині Площина 1 (*Плоскость 1*) та площині Площина 2 (*Плоскость 2*) (рис. 4). Ці профілі обмежені допоміжними осями Вісь 3 (*Ось 3*), Вісь 4 (*Ось 4*) та Вісь 5 (*Ось 5*).

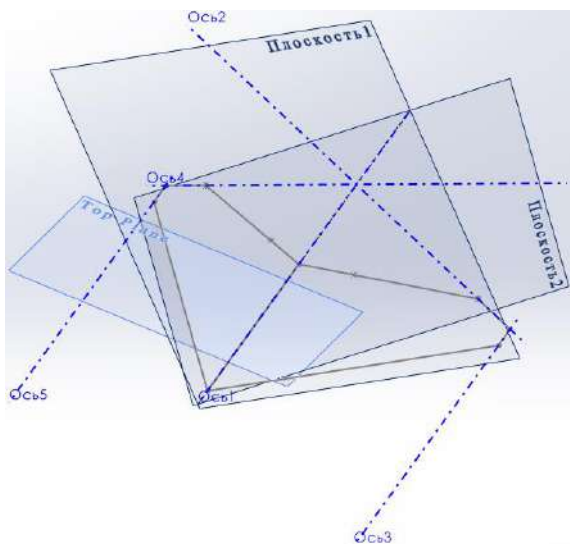


Рис. 4 – Ескізи профілів грудей та крил моделі лапи культиватора

«Зшиваємо» створенні поверхні та заокруглюємо крайку їх перетину змінним радіусом (рис. 5).

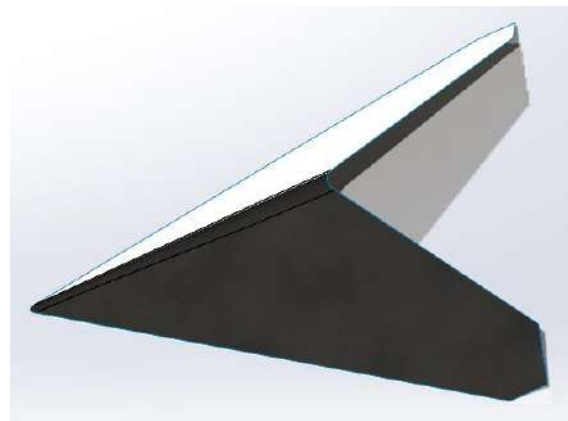


Рис. 5 – Побудована поверхня моделі лапи культиватора без хвостовика

На площині Спереду (*Спереди*) будуємо напрямну криву, яка починається на дотичній заокругленої крайки (рис. 6). У характерних точках кривої створюємо додаткові площини Площина 6 (*Плоскость 6*), Площина 7 (*Плоскость 7*) та Площина 8 (*Плоскость 8*), які нормальні до побудованої напрямної. На кожній площині створюємо ескізи з профілем хвостовика лапи культиватора.

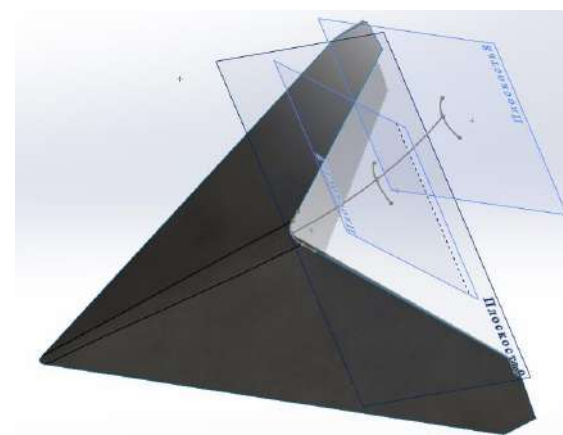
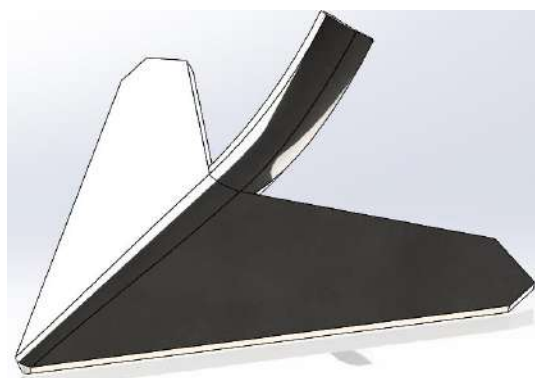


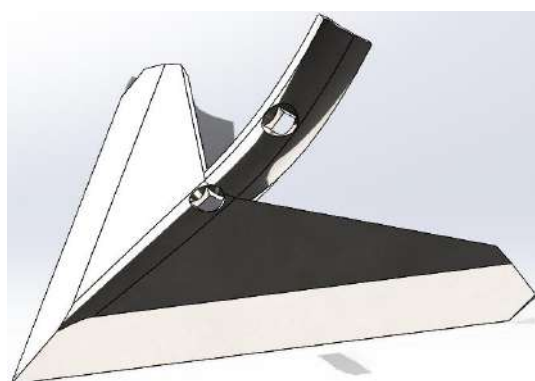
Рис. 6 – Побудова хвостовика моделі лапи культиватора

Будуємо хвостовик лапи культиватора та «зшиваємо» всі поверхні. Надаємо товщину побудованій поверхні лапи. Створюємо отвори для кріплення лапи культиватора до стояка та леза до лапи (рис. 7).

Будуємо стояк лапи культиватора. На площині Справа (*Справа*) створюємо ескіз напрямної лінії (рис. 8). На ній розташовуємо допоміжні точки для побудови допоміжних площин.



а



б

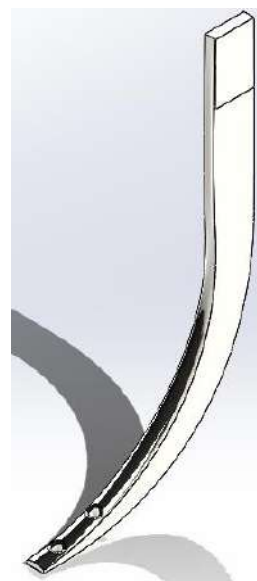
**Рис. 7** – Перетворення поверхні лапи в модель:  
а – перетворення поверхні лапи в модель;  
б – модель лапи культиватора



**Рис. 8** – Напрямна лінія моделі стояка лапи культиватора

Через допоміжні точки будуюмо допоміжні площини, які нормальні до прямої лінії. На кожній площині будуюмо переріз профілю стояка. Будуюмо модель стояка (рис. 9). Створюємо отвори кріплення лапи до стояка.

Проводимо складання робочого органу культиватора (рис. 10).



**Рис. 9** – Модель стояка лапи культиватора



**Рис. 10** – Комп'ютерна модель лапи культиватора

Для проведення досліджень впливу зовнішнього навантаження на робочий орган (Weber & Verna, 2016; Verna & Weber, 2019b; Трикін та ін., 2019; Мороз, 2022) активуємо інструмент SolidWorks Simulation з панелі інструментів Simulation (рис. 11). Створюємо Нове дослідження (Новое исследование), а у вікні менеджера властивостей вибираємо Статичний (Статический).



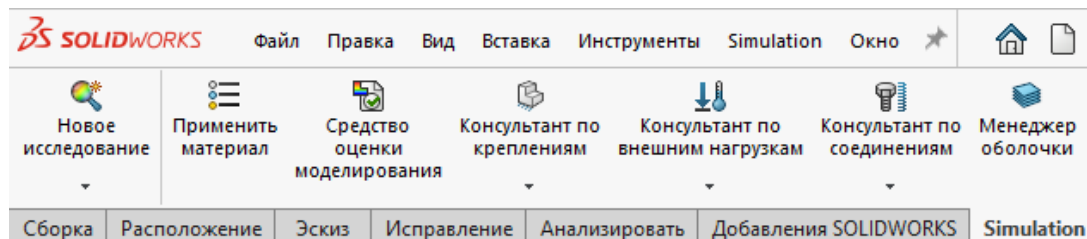


Рис. 11 – Створення нового дослідження в SolidWorks Simulation

Поділяємо модель лапи культиватора на складові. На одній з складових моделі вказуємо системі, що вона «закріплена» та нерухома (на рис. 12 – стрілочки зеленого кольору). До іншої складової моделі прикладаємо зусилля опору ґрунту, що визначене за умови роботи культиваторної лапи на певній глибині та розосереджене здовж обох лез лапи паралельно напрямку руху культиватора (на рис. 12 – стрілочки червоного кольору).

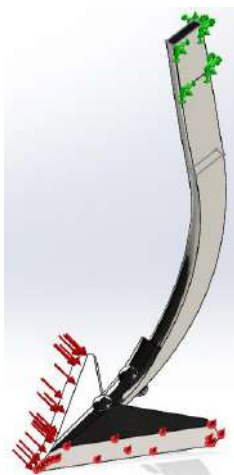


Рис. 12 – Схема навантаження лапи

Для проведення більш якісного аналізу впливу зовнішнього навантаження на модель лапи культиватора поділяємо її поверхню на ділянки, тобто створюємо сітку.

Запускаємо дослідження. Система подає результати дослідження у вигляді діаграм, які відображаються в дереві побудов (рис. 13). При вибиранні якогось результату дослідження система буде відтворювати відповідну діаграму (рис. 14), на якій зображені значення параметрів від мінімуму до максимуму.

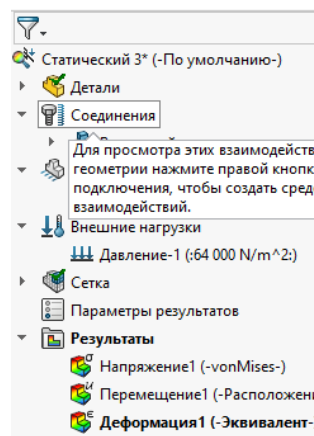


Рис. 13 – Зображення дерева побудов

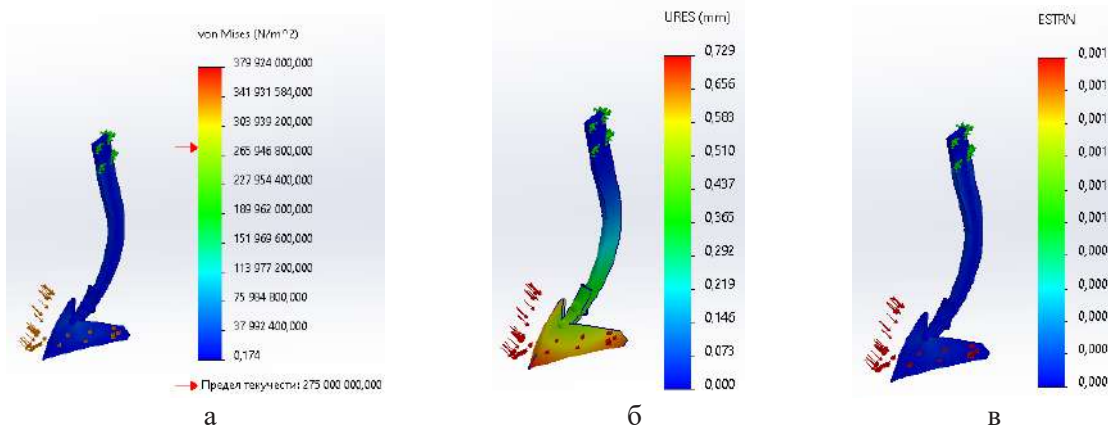


Рис. 14 – Діаграми результатів дослідження:

а – внутрішніх напружень; б – переміщення під дією зовнішніх сил; в – величини деформації

Отже, вже на етапі проектування об'єкта конструктор отримує інформацію щодо його поведінки та, за необхідності, має можливість зробити корективи в його геометричних або механічних параметрах.

### ВИСНОВКИ

Отримані в результаті комп'ютерного моделювання лапи культиватора дані допомагають визначити небезпечні зони моделі лапи, провести оптимізацію її розмірів, раціонально вибрати матеріали для її виготовлення та змінювати зовнішнє навантаження. Оперуючи цими та іншими параметрами можна забезпечити належну якість готового виробу залежно від вибраних матеріалів із урахуванням їх вартості.

Для прискорення впровадження та сталого використання таких комп'ютерних програм потрібно не лише впроваджувати в навчальний процес їх вивчення, але й постійно їх використовувати під час викладання освітніх компонент технічного напрямку протягом усього періоду навчання здобувачів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Keska, P. (2021). *SolidWorks 2021: Part Modeling, Assemblies, and Drawings*. CADvantage.
- Tickoo, S. (2017). *SolidWorks 2017 for Designers*. CADCIM Technologies.
- Tickoo, S. (2020). *SolidWorks 2020 for Designers*. CADCIM Technologies.
- Verna, G., & Weber, M. (2019a). *SolidWorks 2020 Black Book*. CADCAMCAE WORKS.
- Verna, G., & Weber, M. (2019b). *SolidWorks Simulation 2020 Black Book*. CADCAMCAE WORKS.
- Weber, M., & Verna, G. (2016). *SolidWorks Simulation 2017 Black Book*. CADCAMCAE WORKS.
- Василенко, П. М., & Бабий, П. Т. (1961). *Культиваторы (Конструкция, теория и расчет) (Cultivators (Design, theory and calculation))*. Киев: УАСХН.
- Войтюк, Д. Г., Барановський, В. М., Булгаков, В. М. та ін. (2005). *Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку (Agricultural machines. Basics of theory and calculation)*. Київ: Вища освіта.
- Заїка, П. М. (2001). *Теорія сільськогосподарських машин. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту (Theory of agricultural machines. Machines and tools for soil cultivation)*. Т. 1. Харків: ОКО.
- Мороз, С. М. (2022). Вплив інформаційних технологій на підготовку спеціалістів технічного напрямку (*The influence of information technologies on the training of technical specialists*). *Scientific and pedagogical internship «Modern European trends in the development of engineering education»: Internship proceedings* (pp. 50-54). Wloclawek.
- Сисолін, П. В., Сало, В. М., & Кропивний, В.М. (2001). *Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування, Книга 1. Машини для рільництва (Agricultural machines: theoretical foundations, construction, design, Book 1. Agricultural machines)*. За ред. М. І. Черновола. Київ: Урожай.
- Сисолін, П. В., Сало, В. М., & Свірень, М. О. (2002). *Сільськогосподарські машини (практичні заняття) (Agricultural machines (practice))*. Кіровоград: Рай. друкарня.
- Трикін, Д. М., Мороз, С. М., Васильковська, К. В., & Карпушин, С. О. (2019). Використання сучасних систем САПР при проектуванні сільськогосподарських машин (*The use of modern CAD systems in the design of agricultural machines*). *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 49, 233-241. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.233-241>
- Хайлис, Г.А. (1992). *Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин (Fundamentals of the theory and calculation of agricultural machines)*. Киев: Издательство УСХА.

## STUDY OF THE EFFECT OF SAPROPEL WITH NATURAL MOISTURE CONTENT ON SOYBEAN YIELD UNDER EXTREME MOISTURE SHORTAGE

I. Tsiz<sup>1\*</sup>, V. Didukh<sup>1</sup>, O. Holii<sup>2</sup>, V. Khvesyk<sup>3</sup>, V. Holii<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

<sup>2</sup>SEERF «ELITA», Rokiny, Ukraine

<sup>3</sup>Liubeshiv Technical Vocational College of LNTU, Liubeshiv, Ukraine

<sup>4</sup>LLC «Telesvit», Lutsk, Ukraine

---

AGRICULTURAL MACHINES

AM  
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

---

### ABSTRACT

*Achieving high crop yields depends largely on weather conditions, which change from year to year. As a result of soil degradation processes in Ukraine, the humus content has decreased by almost a third and is still decreasing. One of the ways to replenish the humic complex of the soil is to apply organic fertilisers, in particular organic sapropele. The positive effect of sapropele fertilisers on the components of soil fertility has been confirmed by many studies. It is also known that mined sapropele has a high moisture content, which ranges from 92–98% for its organic type. The addition of sapropele with natural moisture content ensures the formation of an additional moisture reserve in the soil. The effect can be achieved by local application of sapropele, for example when soybeans are sown using strip-till technology. This paper presents the methodology and results of a study of the effect of organic sapropele with natural moisture content on soybean yield under extreme moisture deficiency. The experiments were carried out in a soil channel and included seven options that differed in terms of cultivation and fertilisation systems. During the experiment, extreme moisture conditions were created by watering only three times during the entire growing season. Soil moisture was also measured systematically in each of the treatments. Analysis of the measurement results showed no significant influence of the moisture content of natural sapropele on the total soil moisture in the experimental treatments. However, an increase in soybean yield of up to 10% was observed in the experimental variants with sapropele. Based on the results of the research, a scheme of a machine for sowing soybeans using Strip-till technology with simultaneous introduction of sapropele with natural moisture content is proposed.*

#### **Key words:**

soil fertility,  
insufficient hydration,  
sapropele with natural moisture  
content,  
soybean yield,  
Strip-till technology

#### **Article history:**

Received 21.04.2023

Accepted 01.06.2023

#### **\*Corresponding author:**

tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1013

#### **To cite this article:**

Tsiz, I., Didukh, V., Holii, O., Khvesyk, V., & Holii, V. (2023). Study of the effect of sapropele with natural moisture content on soybean yield under extreme moisture shortage. *Agricultural Machines*, 49, 22-30. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1013>

УДК 631.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ САПРОПЕЛЮ ПРИРОДНОЇ ВОЛОГОСТІ НА УРОЖАЙНІСТЬ СОЇ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ НЕСТАЧІ ВОЛОГИ

І.Є. Цизь<sup>1\*</sup>, В.Ф. Дідух<sup>1</sup>, О.В. Голій<sup>2</sup>, В.О. Хвесик<sup>3</sup>, В.О. Голій<sup>4</sup><sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>ДПЕДГ «Еліта», Рокині, Україна<sup>3</sup>Любешівський технічний фаховий коледж ЛНТУ, Любешів, Україна<sup>4</sup>ТОВ «Телесвіт», Луцьк, Україна

### АНОТАЦІЯ

Одержання високих урожаїв сільськогосподарських культур здебільшого залежить від погодних умов, які з кожним роком змінюються. У результаті процесів деградації у ґрунтах України вміст гумусу знизився майже на третину та продовжує зменшуватися. Одним із шляхів поповнення гумінового комплексу ґрунту є внесення органічних добрив, зокрема сапропелю. Позитивний вплив сапропелевих добрив на складові родючості ґрунту підтверджено багатьма дослідженнями. Також відомо, що добутий сапропель має високий вологовміст, який коливається для його органічного типу у межах 92–98%. Внесення сапропелю природної вологості забезпечить формування у ґрунті додаткового запасу вологи. Досягнення ефекту можливе за локального внесення сапропелю, наприклад під час посіву сої за технологією Strip-till. У статті подано методiku та результати дослідження впливу органічного сапропелю природної вологості на урожайність сої за екстремальної нестачі вологи. Експерименти закладались у ґрунтового каналі та передбачали сім варіантів, які відрізнялися системами землеробства та удобрення. Під час дослідів створювали екстремальні умови зволоження шляхом лише триразового поливу упродовж усього періоду вегетації. Також проводили систематичне вимірювання вологості ґрунту кожного варіанту. Аналіз результатів вимірювань не виявив суттєвого впливу вологи природного сапропелю на загальну вологість ґрунту у варіантах дослідів. Приріст урожайності зерна сої становить до 10% у варіантах дослідів із сапропелем. Запропоновано схему машини для посіву сої за технологією Strip-Till із одночасним внесенням сапропелю природної вологості.

#### Ключові слова:

родючість ґрунту,  
недостатнє зволоження,  
сапропель природної вологості,  
урожайність сої,  
технологія Strip-till

#### Історія публікації:

Отримано 21.04.2023

Затверджено 01.06.2023

#### \*Автор для листування:

tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1013

#### Цитувати цю статтю:

Цизь, І. Є., Дідух, В. Ф., Голій, О. В., Хвесик, В. О., & Голій, В. О. (2023). Дослідження впливу сапропелю природної вологості на урожайність сої за екстремальної нестачі вологи. *Сільськогосподарські машини*, 49, 22-30. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1013>



## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Загальновідомим фактом є залежність урожайності сільськогосподарських культур від якісних показників ґрунту. До важливих характеристик ґрунту науковці відносять: вміст гумусу, вміст вологи, рівень рН, забезпеченість макро- та мікроелементами, наявність позитивної мікрофлори, твердість, наявність водостійкої та зв'язаної структури агрегатів тощо (Лихочвор, 2002; Назаренко та ін., 2004; Тихоненко та ін. 2005; Тихоненко та ін., 2012). Одержання високих урожаїв у сільському господарстві здебільшого залежить від погодних умов, які щороку змінюються. Під час вирощування сільськогосподарських культур рослинами споживається певна частина поживних речовин із ґрунту, які виносяться за межі поля із зібраним урожаєм. Винесені із урожаєм поживні речовини з ґрунту компенсуються шляхом внесення підвищених доз мінеральних добрив (*Fertilizer use by crop in Ukraine, 2005*). Внаслідок цього порушується рівновага та саморегуляція в процесах накопичення органічних сполук, тобто процеси розкладання (мінералізації) починають переважати процеси гуміфікації. Тому має місце явище дегуміфікації ґрунту. Як внаслідок, послаблюються відтворювальні властивості ґрунту, протиерозійна стійкість та протидія хіміко-техногенному впливу на нього (Медведев, 2004; Сергеев та ін., 2004; Балюк та ін., 2017; Охорона ґрунтів, 2019). Без внесення органічних добрив сукупність цих факторів викликає зниження родючості ґрунту. Ця проблема набула світового значення, але особливо актуальною вона стала для України (Hartati, 2015; Simionescu et. al., 2016; Охорона ґрунтів, 2019).

Ґрунти всіх ґрунтово-кліматичних зон України мають дефіцит поживних речовин та ознаки деградації, поміж яких: дегуміфікація, зменшення поживних речовин, ерозія, переущільнення, підкислення, кіркоутворення, втрата структури, заболочування, забруднення радіонуклідами і важкими металами.

Дослідження науковців засвідчують, що в результаті процесів деградації за 110 років (1881–1991 рр.) у ґрунтах України вміст гумусу знизився майже на третину (з 4,2% до 3,2%). Оновлені дані вказують на зниження цього показника до 3,0% та нижче (Балюк та ін., 2017; Охорона ґрунтів, 2019).

Одним із шляхів поповнення гумінового комплексу ґрунту є внесення органічних добрив, зокрема органічного сапропелю. Внаслідок вмісту в сапропелі гумінових речовин, які мають акумулятивні, транспортні, радіопротекторні, регулювальні та фізіологічні властивості, сапропелі рекомендовані до використання на екологічно та радіаційно-забруднених територіях (Шевчук, 1996; Stankevica et. al., 2016; Цизь та ін., 2021). Потенціал сапропелів як альтернативного джерела органічної речовини для збереження та відтворення родючості ґрунтів України становить 140 млн т (у перерахунку на 60% вологості) (Шевчук, 1996).

Позитивний вплив сапропелевих добрив на водно-повітряний та температурний режим виявлено у дослідженнях багатьох вчених (Шевчук, 1996; Grantina-Ievina et. al., 2014; Murunga et. al., 2020). Під час внесення сапропелю у ґрунт спостерігається його сприятлива дія на водно-фізичні властивості ґрунту, зокрема збільшення повної та капілярної вологості, вологоутримуючої здатності та вологості верхнього горизонту (Booth et. al., 2007; Bakšienė & Ciūnys, 2012). Аналіз відомих досліджень демонструє, що вплив сапропелю на родючість ґрунту є значним та комплексним, оскільки він є екологічно чистою органо-мінеральною сировиною, яка вдосконалює та покращує структуру ґрунту, а також він є якісним джерелом поповнення гумусу (Grantina-Ievina et. al., 2014; Цизь та ін., 2021).

Водночас, необхідно звернути увагу на високий вологовміст щойно добутого сапропелю, який коливається для його органічного типу у межах 92–98 % (Шевчук, 1996). Технології використання сапропелю передбачають його зневоднення до вологості 60%. Внесення сапропелю природної вологості на поля, які розташовані на відстані до 20 км від місця його добування, окрім відсутності витрат на зневоднення, забезпечить ще й формування у ґрунті додаткового запасу вологи. Очевидно, що досягнення ефекту можливе за локального внесення сапропелю, зокрема під культури із широкорядним способом посіву.

Кліматичні зміни, енергетична криза та процеси деградації ґрунтів змушують аграріїв відмовлятися від класичних систем ведення землеробства й впроваджувати енерго- та

ресурсозберігаючі системи Mini-till, No-till, Strip-till, Verti-till (Косолап & Кротінов, 2011; Jaskulska et al., 2020; Kargwal et al., 2022). Тому все більшої популярності набуває вирощування сої за технологіє Strip-till, яка передбачає її посів із шириною міжряддя 45 см (Farmaha et al., 2011).

**Мета дослідження** – встановлення впливу органічного сапропелю природної вологості на урожайність сої за екстремальної нестачі вологи у ґрунті.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для проведення вегетаційного досліду було використано ґрунтовий канал кафедри аграрної інженерії імені проф. Г. А. Хайліса ЛНТУ, в якому за допомогою перегородок було сформовано сім секцій шириною 45 см кожна (рис. 1). У сформовані секції висівалась соя сорту Апполо з нормою висівів 120–140 кг/га на глибину 3 см. Окрім цього, у секціях відтворювались умови класичної системи обробки ґрунту та Strip-Till, а також застосовувалось удобрення за схемою, що подана в таблиці 1.

Для відтворення умов смугового обробки ґрунту за технологією Strip-till з країв секцій вкладали моноліт ґрунту товщиною 12 см, а внутрішню частину заповнювали розпушеним ґрунтом. Внаслідок цього утворювалась смуга розпушеного ґрунту шириною 21 см. Далі на поверхні розміщувалась подрібнена солома та перемішувалась з поверхневим шаром ґрунту (розпушеної зони).

Для відтворення в ґрунтовому каналі умов класичного обробки ґрунту секція каналу заповнювалась розпушеним ґрунтом (рис. 1).



**Рис. 1** – Ґрунтовий канал із закладеними зразками ґрунту

У ґрунті кожної секції, відповідно до схеми експерименту, формували борозенки глибиною 13 см, в які вносили добрива (зокрема сапропель) та закривали їх ґрунтом. Формували борозенки глибиною 3 см і вкладали по десять насінин сої (рис. 2, а). Кількість насінин, яка висівалась в одній секції, відповідає рекомендованій нормі висіву у 120–140 кг/га. Після цього борозенки закривали ґрунтом та ущільнювали його поверхню. Аналогічно закладались досліди за системою Strip Till (рис. 2, б).

Під час досліду створювали екстремальні умови зволоження шляхом триразового поливу упродовж усього періоду вегетації з розрахунку 10 мм води на кожен варіант досліду. Також проводили систематичне вимірювання вологості ґрунту у трьох точках кожної секції за допомогою електронного вологоміра ґрунту МГ-44 (рис. 3, а).

**Таблиця 1** – Система землеробства та удобрення дослідних ділянок

Особливості системи землеробства та удобрення	Варіанти досліду							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7 (контроль)	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Система землеробства	класична	Strip-Till	Strip-Till	класична	Strip-Till	класична	класична	класична
Удобрення	КАС 32 100 кг/га	КАС 32 100 кг/га	N <sub>45</sub> P <sub>45</sub> K <sub>45</sub>	N <sub>45</sub> P <sub>45</sub> K <sub>45</sub>	сапропель 20 т/га	сапропель 20 т/га	відсутнє	відсутнє



**Рис. 2** – Закладання дослідів:  
а – традиційна технологія; б – технологія Strip-till



**Рис. 3** – Вимірювання вологості ґрунту вологоміром МГ-44 (а) та визначення урожайності сої (б)

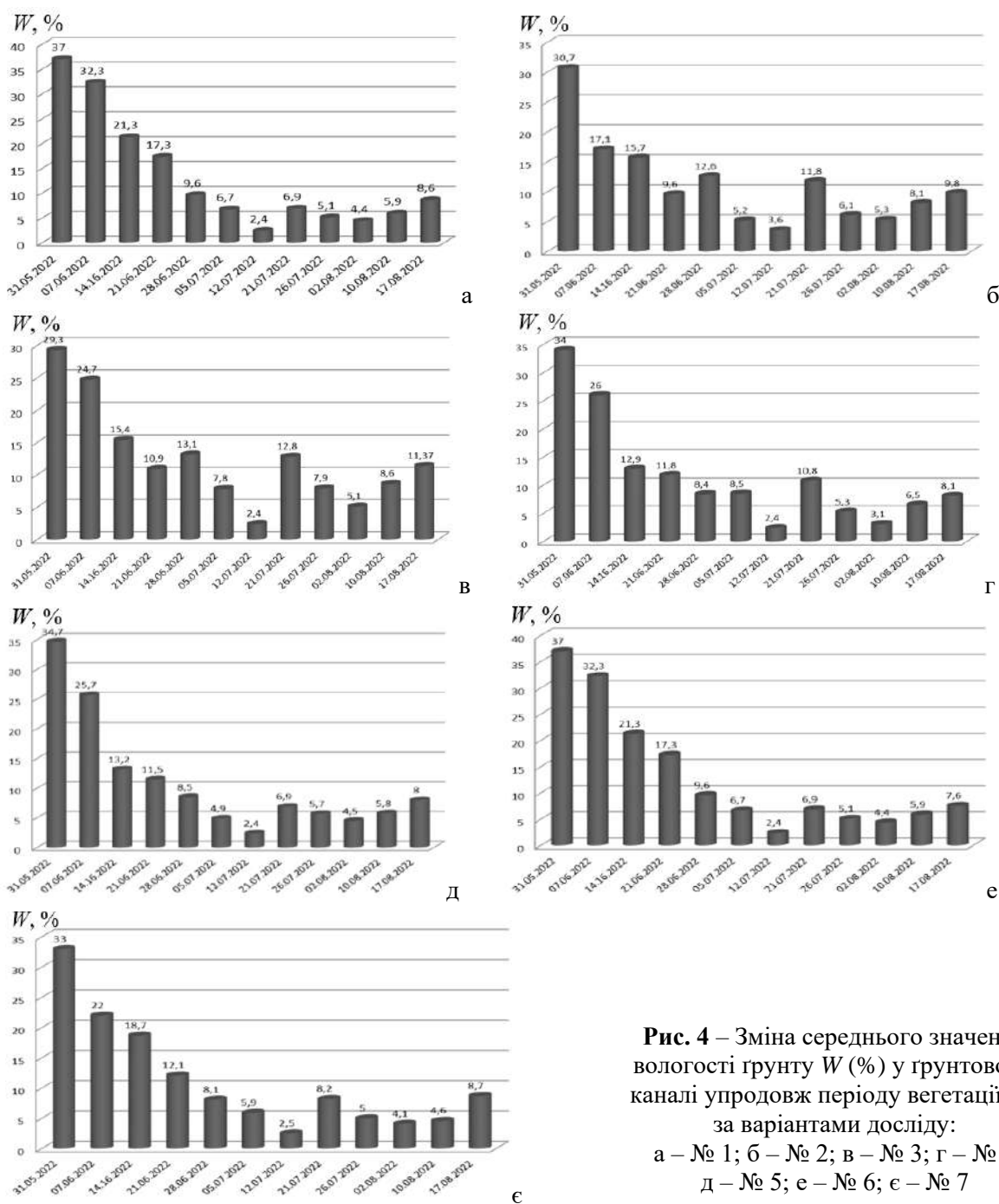


Для визначення урожайності сої збирали окремо рослини із кожної секції. Далі відокремлювали стручки та виймали зерна (рис. 3, б). Зібрані із кожної секції зерна зважували з точністю 0,01 г на вазі ТВЛ-0,5.

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ТА ОБГОВОРЕННЯ**

За середніми значеннями вимірної під час проведення експерименту вологості ґрунту побудовані гістограми (рис. 4). Аналіз графіків

(рис. 4) показує, що в початковий момент вологість ґрунту становила у межах 30%, що вплинуло на інтенсивну появу сходів сої та подальший їх розвиток. Зростання вологості ґрунту під час вимірювання 21.07.2022 р. та 10.08.2022 р. спричинено поливом, який було проведено 12.07.2022 р. та 02.08.2022 р. На момент третього поливу ґрунту (25.08.2022 р.) контроль вологості ґрунту уже не проводився. Встановлено відсутність суттєвого впливу вологості сапропелю на вологість ґрунту.



**Рис. 4** – Зміна середнього значення вологості ґрунту W (%) у ґрунтовому каналі упродовж періоду вегетації сої за варіантами досліді:  
а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4;  
д – № 5; е – № 6; є – № 7

У процесі вегетації (рис. 5) найбільш інтенсивно розвивалися рослини у варіантах дослідів № 5 та № 6, де вносили сапропель, що було закладено за класичною технологією і, особливо, за технологією Strip-Till. Також з рис. 5, а видно, що за класичної системи обробітку ґрунту, удобрення КАС-32 та за умов нестачі вологи, рослини сої почали гинути (варіант дослідів № 1). У подальшому відбулась повна загибель рослин та урожай сої не був сформований за цим варіантом дослідів.

У таблиці 2 подані значення урожайності сої за варіантами дослідів. Аналіз отриманих даних показує, що у випадку використання в якості добрива сапропелю 20 т/га за системи Strip-Till та класичної системи обробітку ґрунту приріст урожаю відносно контролю (варіант № 7) складає, відповідно, 9,8% та 9,4%. Також приріст у 10,0% досягнуто у варіанті № 3, тобто під час удобрення комплексом NPK та системи обробітку ґрунту

Strip-Till. В інших варіантах урожайність менша, ніж у контрольному варіанті.

Оскільки результати дослідження вказують на позитивний ефект від використання в якості добрив сапропелю природної вологості, було розроблено функціональну схему машини, яка дозволяє реалізувати цей спосіб удобрення (рис. 6). Машина містить два модулі. Перший модуль – це машина, яка транспортує сапропель природної вологості та подає його шнековим насосом до шлангів посівних секцій.

На додаткову задню навіску цистерни навішується другий модуль. Це сівалка, яка проводить одночасний обробіток смуг ґрунту та посів насіння сої за технологією Strip-Till. Відмінністю від існуючих машин є те, що в зону дії розпушувальної лапи трубопроводом подається сапропель природної вологості. Далі сапропель вкривається шаром ґрунту, на який вкладається насіння сої.



а

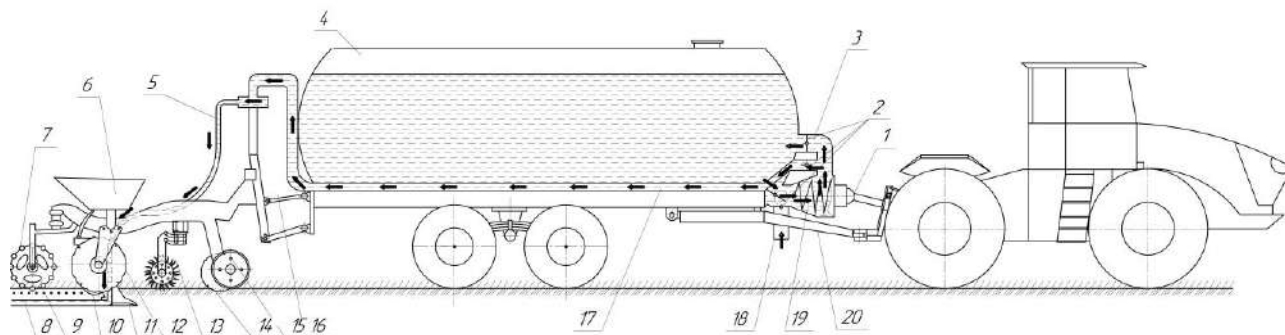


б

**Рис. 5** – Демонстрація впливу систем обробітку та удобрення ґрунту на вегетацію сої:  
а – варіанти дослідів від № 7 до № 1 (зліва направо);  
б – варіанти дослідів № 7, № 6 та № 5 (зліва направо)

Таблиця 2 – Результати визначення урожайності сої за варіантами дослідів

Урожайність сої за варіантами дослідів											
№ 2		№ 3		№ 4		№ 5		№ 6		№ 7	
г	ц/га	г	ц/га	г	ц/га	г	ц/га	г	ц/га	г	ц/га
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2,29	25,4	4,34	48,2	3,02	33,6	4,33	48,1	4,31	47,9	3,94	43,8



**Рис. 6** – Функціональна схема машини для посіву сої за технологією Strip-Till із одночасним внесення сапропелю природної вологості:

- 1 – вал приводу насоса; 2 – заслінки; 3 – трубопровід завантаження цистерни; 4 – цистерна; 5 – шланг; 6 – бункер насіння; 7 – коток; 8 – шар сапропелю; 9 – насіння; 10 – сошник; 11 – розпушувальна лапа; 12 – розпушувальний диск; 13 – очисник обробленої смуги; 14 – розрізаючий диск; 15 – опорне колесо; 16 – навіска; 17 – магістральний трубопровід подачі сапропелю; 18 – всмоктувальний трубопровід; 19 – шнековий насос; 20 – причіпний пристрій

## ВИСНОВКИ

На початку дослідження впливу систем обробітку ґрунту та удобрення на урожайність сої (за умови екстремальної нестачі вологи у ґрунті) вологість ґрунту становила 30%, що вплинуло на інтенсивну появу сходів сої та подальший їх розвиток. У процесі вегетації найбільш інтенсивно розвивалися рослини у варіантах дослідів, де вносили сапропель за класичною технологією та, особливо, за технологією Strip-Till, що забезпечило приріст урожайності до 10% порівняно з контрольним варіантом. Також під час дослідів встановлено, що за класичної системи обробітку ґрунту, удобрення КАС-32 і умов екстремальної нестачі вологи рослини сої загинули та урожай не був сформований.

Підтверджено доцільність використання сапропелю природної вологості в якості органічного добрива та накопиченої у ньому вологи для росту сої за умов екстремальної

нестачі опадів. Внесення сапропелю природної вологості доцільно проводити під час вирощування сої за технологією Strip-Till. При цьому можна використати модернізовані за схемою, що подана на **рис. 6**, машини для внесення рідких органічних добрив.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Bakšienė, E., & Ciūnys, A. (2012). Dredging of lake and application of sapropel for improvement of light soil properties. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 20(2), 97-103. <https://doi.org/10.3846/16486897.2011.645824>
- Booth, C. A., Baksiene, E., Fullen, M. A., & Ciunys, A. (2007). Long-term agrochemical dynamics: engineering, application and challenges of calcareous sapropel as a soil fertilizer. *International Journal of Ecodynamics*, 2(2), 108-116. <https://doi.org/10.2495/ECO-V2-N2-108-116>
- Farmaha, B. S., Fernández, F. G., & Nafziger, E. D. (2011). No-till and strip-till soybean production

- with surface and subsurface phosphorus and potassium fertilization. *Agronomy Journal*, 103(6), 1862-1869. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2011.0149>
- Fertilizer use by crop in Ukraine. (2005). Published by FAO, Rome.
- Grantina-Ievina, L., Karlsons, A., Andersone-Ozola, U., & Ievinsh, G. (2014). Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content. *Zemdirbyste-Agriculture*, 101(4), 355-366. <https://doi.org/10.13080/Z-A.2014.101.045>
- Hartati, S. (2015). The balance of organic and inorganic fertilizers to nutrient limiting factors, soil fertility and maize (*Zea Mays* L) yield on paddy soil of excavated (Galian C). *Sains Tanah – Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 11(2), 122-129.
- Jaskulska, I., Romaneckas, K., Jaskulski, D., Gałczewski, L., Breza-Boruta, B., Dębska, B., & Lemanowicz, J. (2020). Soil properties after eight years of the use of strip-till one-pass technology. *Agronomy*, 10(10), 1-16. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101596>
- Kargwal, R., Yadvika, Kumar, A., Garga, M. K., & Chanakaewsomboone, I. (2022). A review on global energy use patterns in major crop production systems. *Environmental Science: Advances*, 1, 662-679.
- Murunga, S. I., Wafula, E. N., & Sang, J. (2020). The use of freshwater sapropel in agricultural production: a new frontier in Kenya. *Advances in Agriculture*, 2020, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2020/8895667>
- Simionescu, V. M., Rusu, M., & Bulica, I. (2016). Importance of systematic fertilization with mineral and organic fertilizers for preserving and increasing soil fertility. *Scientific papers series management, economic engineering in agriculture and rural development*, 16(1), 487-492.
- Stankevica, K., Vincevica-Gaile, Z., & Klavins, M. (2016). Freshwater sapropel (gyttja): Its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture. *Agronomy Research*, 14(3), 929-947.
- Балюк, С. А., Медведєв, В. В., Воротинцева, Л. І., & Шимель, В. В. (2017). Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня (*Modern problems of soil degradation and measures to achieve a neutral level of soil degradation*). *Вісник аграрної науки*, 8, 5-11.
- Косолап, М. П., & Кротінов, О. П. (2011). *Система землеробства No-till (Farming system No-till)*. Київ: Логос.
- Лихочвор, В. В. (2002). *Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур (Plant growing. Technologies for growing agricultural crops)*. Львів: НВФ Українські технології.
- Медведєв, В. В. (2004). Проблеми охорони ґрунтів (*Problems of soil protection*). *Вісник аграрної науки*, 1, 53-57.
- Назаренко, І. І., Польчина, С. М., & Нікорич, В. А. (2004). *Ґрунтознавство (Soil science)*. Чернівці: Книги – XXI.
- Охорона ґрунтів (*Soil protection*): зб. наук. пр. ДУ «Держґрунтоохорона». Спецвипуск. Моніторинг ґрунтів як невід'ємна частина моніторингу довкілля. (2019). *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції*.
- Сергєєв, В. В., Бенцаровський, Д. М., & Кисіль, В. І. (2004). Агрохімічні пріоритети охорони родючості ґрунтів (*Agrochemical priorities of soil fertility protection*). *Вісник аграрної науки*, 11, 5-7.
- Тихоненко, Д. Г., Горін, М. О., Лактіонов, М. І. та ін. (2005). *Ґрунтознавство (Soil science)*. Київ: Вища освіта.
- Тихоненко, Д. Г., Дегтярьов, В. В., & Величко, В. А. (2012). Фізичні основи родючості ґрунтів (*The physical basis of soil fertility*). *Вісник аграрної науки*, 11, 6-9.
- Цизь, І. Є., Хомич, С. М., & Сацюк, В. В. (2021). Агро-екологічні аспекти добування та використання сапропелю (*Agro-ecological aspects of mining and use of sapropel*). *Сільськогосподарські машини*, 47, 37-45. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.625>
- Шевчук, М. Й. (1996). *Сапропелі України: запаси, якість та використання (Sapropels of Ukraine: stocks, quality and prospects of use)*. Луцьк: Надстир'я.

**STUDY OF DESTRUCTION PROCESS OF LINSEED STEMS BY ROLLERS  
WITH TRAPEZOIDAL TEETH**

V. Didukh, D. Albota\*, M. Bodak

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine***ABSTRACT**

*The efficiency of linseed production depends on the degree of use of all components of the crop. As a result of climatic changes caused by global warming, linseed is grown throughout the territory of Ukraine. The yield of linseed stem mass in the northern regions of Ukraine is much higher than in the southern regions, reaching 45 t/ha. The presence of fiber in the linseed stems gives them elastic properties. As a result, there are difficulties with the formation of rolls. The article examines the process of interaction between the linseed stems and the trapezoidal teeth of the rollers. A methodology for studying the static destruction of a single linseed stem is proposed, and the results of experimental studies of stem destruction using a trapezoidal tooth model are presented. During the experimental studies, the factors influencing the values of static displacement and dynamic characteristics of the flax stem layer were determined. An analysis of the process of passing a single linseed stem between the rollers was carried out, and the forces acting on the stem during interaction with the rollers were determined. In order to maintain the integrity of the fiber and ensure the continuity of the stem flow during processing, studies were conducted to determine the breaking strength of the stems. The advantages of using the proposed tooth profile of the decorticator's grinding rollers were determined, and the process of flax stem destruction by the edge of the trapezoidal tooth was calculated. The results of the research show that the treatment of flax stems with the proposed trapezoidal toothed rollers makes it possible to achieve a reduction in the elastic properties of the stems and to preserve the integrity of the fibre, since the force for breaking the stems by hitting the rib of a trapezoidal tooth is lower in comparison with the breaking force. The results of the study allow us to substantiate tooth profile of the decorticator's grinding rollers of the proposed linseed harvesting machine.*

**Key words:**

linseed,  
flax stem,  
grinding rollers,  
flax stem destruction,  
trapezoidal tooth

**Article history:**

Received 27.04.2023

Accepted 01.06.2023

**\*Corresponding author:**

kobzar\_volun@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1016

**To cite this article:**

Didukh, V., Albota, D., & Bodak, M. (2023). Study of destruction process of linseed stems by rollers with trapezoidal teeth. *Agricultural Machines*, 49, 31-38. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1016>



УДК 677.11.08

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО  
ВАЛЬЦЯМИ З ТРАПЕЦІЄПОДІБНИМИ ЗУБЦЯМИ****В.Ф. Дідух, Д.С. Альбота\*, М.В. Бодак***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Ефективність виробництва льону олійного залежить від ступеня використання всіх складових урожаю. Внаслідок кліматичних змін, що зумовлені глобальним потеплінням, льон олійний вирощують по всій території України. Урожайність стеблової маси у північних областях України значно вища ніж у південних областях і досягає 45 ц/га. Наявність волокна в стеблах льону олійного надає їм пружних властивостей. Відповідно, виникають складнощі із формуванням рулонів. У статті досліджено процес взаємодії стебел льону олійного з трапецієподібними зубцями вальців. Запропоновано нову методику дослідження статичного руйнування окремого стебла льону та представлені результати експериментальних досліджень руйнування стебла із використанням моделі трапецієподібного зубця. Визначені фактори, які впливають на значення статичного переміщення та динамічних характеристик шару стебел льону. Проведено аналіз процесу проходження окремого стебла льону олійного між вальцями та визначені сили, які діють на стебло під час взаємодії з вальцями. Для збереження цілісності волокна льону та забезпечення нерозривності потоку стебел під час оброблення проведені дослідження з визначення розривної сили стебел льону. Встановлені переваги використання запропонованого профілю зубців м'яльних вальців декортикатора та проведено розрахунок процесу руйнування стебла льону олійного ребром трапецієподібного зубця. Оброблення стебел льону запропонованими вальцями з трапецієподібними зубцями дозволяє досягнути зменшення пружних властивостей стебел і зберегти цілісність волокна, оскільки зусилля руйнування стебел ударом зубця менше порівняно з розривним зусиллям стебла. Результати проведених досліджень дозволяють обґрунтувати профіль зубців вальців декортикатора машини для збирання льону олійного.

**Ключові слова:**

льон олійний,  
стебло льону,  
м'яльні вальці,  
руйнування стебла,  
трапецієподібний зубець

**Історія публікації:**

Отримано 27.04.2023

Затверджено 01.06.2023

**\*Автор для листування:**

kobzar\_volun@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1016

**Цитувати цю статтю:**

Дідух, В. Ф., Альбота, Д. С., & Бодак, М. В. (2023). Дослідження процесу руйнування стебел льону олійного вальцями з трапецієподібними зубцями. *Сільськогосподарські машини*, 49, 31-38. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1016>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Рентабельність вирощування будь-якої культури залежить від використання всіх складових урожаю. Практика вирощування льону олійного спрямована на отримання лише насіння. Стебло-волокниста маса льону, яка залишається після відокремлення насіння, подрібнюється та заорюється у ґрунт або ж спалюється на полі (*Yaheliuk et al., 2020*). Обидва варіанти утилізації стебло-волокнистої маси льону олійного спричиняють значну шкоду навколишньому середовищу. Водночас, технології перероблення стебло-волокнистої маси льону олійного залишаються на стадії наукових розробок (*Didukh et al., 2022*).

Внаслідок кліматичних змін, що зумовлені глобальним потеплінням, вирощування льону олійного поширилося всією територією України. Незалежно від кліматичних умов у регіонах України, урожайність насіння льону олійного залишається на рівні 20 ц/га. При цьому урожайність стеблової маси у північних областях України значно вища ніж у південних і досягає 45 ц/га (*Онюх, 2019*). Природно-кліматичні умови вирощування суттєво впливають на фізико-механічні властивості складових урожаю льону олійного (*Stamboulis et al., 2001*).

Технології та засоби збирання льону олійного можна згрупувати таким чином (*Dudarev & Say, 2020; Дідух & Бодак, 2022*):

- пряме комбайнування зернозбиральним комбайном;

- збирання верхівкової частини льону обчисувальними жатками без зрізання стеблостою та подальша утилізація стебло-волокнистої маси;

- роздільна технологія, що передбачає зрізання необмолочених стебел льону у валки, дозрівання насінневих коробочок льону у валках та підбирання валків зернозбиральним комбайном або спеціальними засобами.

Для роздільної технології збирання льону олійного запропонована універсальна машина (*Дідух та ін., 2021*). Машина забезпечує підбирання валків, відокремлення насіння, зменшення пружних властивостей стебел та формування рулонів стебло-волокнистої маси. Машину також можна використовувати для підбирання валків стебло-волокнистої маси, яка залишається після зернозбирального комбайна, у випадку використання прямого

комбайнування під час збирання льону олійного.

Волокно в стеблах льону олійного надає їм пружних властивостей. Відповідно, виникають складнощі із формуванням рулонів. Для їх усунення в запропонованій універсальній машині встановлено декортикатор, робочі органи якого – вальці, що мають різне функціональне призначення, зокрема м'яльні вальці. У декортикаторі встановлено три пари м'яльних вальців.

Результати досліджень руйнування трести луб'яних культур викладені в наукових працях (*Хайліс, 2004; Goudenhoof et al., 2018; Онюх, 2019*). Дослідженнями встановлено, що під час збирання льону олійного на зменшення пружних властивостей стебел впливає їхня вологість, кількість проминань та висота шару стебел (*Дідух & Альбота, 2021; Альбота та ін., 2022*). При цьому потребує обґрунтування форма зубців м'яльних вальців, від яких залежить якість оброблення стебел.

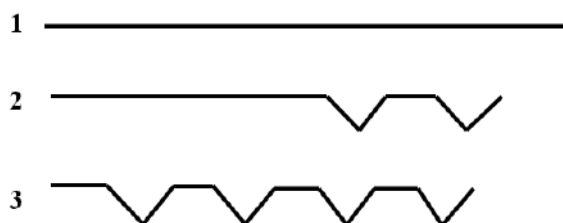
**Мета дослідження** – дослідити процес руйнування стебел льону олійного вальцями з трапецієподібними зубцями.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для визначення деформацій стебла льону олійного, які виникають внаслідок дії трапецієподібного зубця з плоскими гранями, запропонована методика досліджень та розроблене лабораторне устаткування, яке дозволяє фіксувати зусилля, що прикладене до стебла, та зміни стану стебла упродовж руйнування. Пружні властивості стебел льону олійного проявляються внаслідок поєднання у ньому дерев'янистої структури та волокна. Підготування стебло-волокнистої маси до скручування у рулон полягає в руйнуванні лише дерев'янистої структури та забезпеченні збереження цілісності пучків волокон. В ідеальному випадку процес руйнування дерев'янистої структури стебла льону двома сусідніми зубцями буде проходити відповідно до схеми на **рис. 1**.

При проходженні шару стебел льону олійного певної висоти через пару вальців між ними виникають сили: сили тертя; сили нормальної реакції; сила удару ребра зубця одного вальця в плоску грань другого. У подальшому дослідженні процесу зменшення пружних властивостей стебел льону знехтуємо

деякими силами. Визначальною у цьому процесі є сила удару  $P_{уд.}$ . При цьому має виконуватися умова  $P_{уд.} < P_{роз.}$ , тобто сила руйнування ударом  $P_{уд.}$  має бути меншою за силу розривання стебел  $P_{роз.}$ .



**Рис. 1** – Схематичне зображення взаємодії трапецієподібного зубця з стеблом льону: 1 – стебло льону олійного до взаємодії з зубцями вальця; 2 – стебло льону після контакту з двома ребрами першого зубця; 3 – стебло льону після контакту з чотирма ребрами двох сусідніх зубців

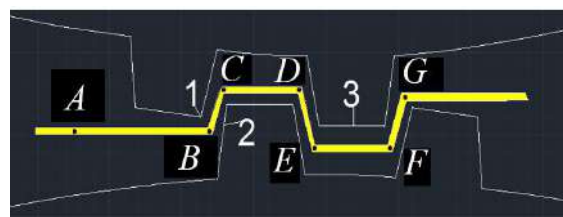
Зображені заглибини на **рис. 1** (позиція 2 та 3) вказують на злам стебла. Ефективний злам дерев'янистої структури стебла льону можливий внаслідок удару ребром зубця по стеблу (**рис. 2**). При цьому на початковій стадії взаємодії грані зубця з стеблом відбувається його прогинання. Для підтвердження цього твердження необхідно розглянути випадки взаємодії пари вальців з позиції виникнення характерних контактів між зубцями, коли між ними знаходиться стебло:

- при захопленні стебла льону олійного трапецієподібними зубцями у деякий момент відбудеться удар ребром 1 (**рис. 2**) верхнього вальця по стеблу відносно похилої грані 2 нижнього вальця; як наслідок, відбувається руйнування дерев'янистої структури стебла, що зображено на **рис. 2** точкою *F*;

- удар заднім ребром того ж зубця по стеблу на ділянці *EF* плоскої грані (**рис. 2**); ефект руйнування дерев'янистої структури стебла ударом залежить від товщини шару стебел і зазору між горизонтальними гранями виступів і западин пари вальців;

- від зусилля удару залежить ступінь руйнування стебел льону, в окремих випадках можливе руйнування не тільки дерев'янистої структури стебла, але й волокна льону, що є негативним явищем, тому умова зменшення пружних властивостей стебел:  $P_{уд.} < P_{роз.}$ ;

- у точках *C*, *D* та *G* (**рис. 2**) можливий лише злам шару стебел товщиною в одне стебло; із збільшенням товщини шару стебел льону загальна його пружність зростає, тому на **рис. 1** зображені горизонтальні ділянки, які вказують, що дерев'яниста структура стебла не є зруйнованою і для зменшення пружних властивостей стебел льону недостатньо однієї пари вальців.



**Рис. 2** – Розміщення стебла льону між виступами і западинами пари вальців із трапецієподібними зубцями

Із урахуванням енергетичного підходу енергія системи «ребро трапецієподібного зубця – стебло льону – опорна поверхня» залишається сталою. Припускаємо, що робота, яка виконана вальцем  $A_6$  вагою  $P$ , що падає з висоти  $h$  (**рис. 3**), повністю переходить в потенціальну енергію деформації  $U_0$  пружної системи:

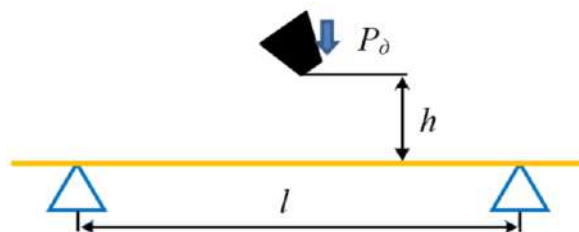
$$A_6 = U_0, \quad (1)$$

де  $A_6 = P(h + \Delta_0)$ ;  $\Delta_0$  – динамічне переміщення пружної системи.

Потенціальна енергія деформації:

$$U_0 = \frac{P_0 \Delta_0}{2}, \quad (2)$$

де  $P_0$  – сила удару по стеблу льону, Н.



**Рис. 3** – Схема до розрахунку руйнування стебел льону олійного

Для визначення максимальних динамічних напружень, які виникають у стеблі льону під час удару, необхідно встановити статичне переміщення ребра від початку контакту до повного руйнування:

$$\Delta_{cm} = \frac{P_{\delta} l^3}{48EI}, \quad (3)$$

де  $E$  – модуль Юнга, Па;  $I$  – момент інерції,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

$$I = \frac{\pi d^4 n}{64}. \quad (4)$$

Коефіцієнт динамічності визначається за виразом:

$$k_{\delta} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{cm}}}. \quad (5)$$

Статичне напруження визначається за виразом:

$$\sigma_{cm} = \frac{\pi d^3}{32}, \quad (6)$$

де  $d$  – діаметр стебла льону, м.

Максимальне динамічне напруження визначається за виразом:

$$\sigma_{\delta \max} = k_{\delta} \sigma_{cm}. \quad (7)$$

Для встановлення зусилля руйнування дерев'янистої структури статичним способом використовувалася модель трапецієподібного зубця (рис. 4, а). Стебла вкладалися у робочу зону моделі та навантажувалися за допомогою преса (рис. 4, б).

Під час дослідження визначалося зусилля руйнування різної кількості стебел льону олійного ( $n = 1$  шт,  $n = 5$  шт,  $n = 10$  шт) за середнього діаметра стебла льону  $d = 1,7$  мм. Максимальна величина прогину стебел льону становила  $h = 20$  мм, що дорівнює розміру основи трапеції. Розрахунки проводили за значення модуля Юнга  $E = 10$  кПа.

Розривне зусилля стебел льону визначали за допомогою пристосування (рис. 5), яке встановлювали у прес (рис. 4, б).

Розривне зусилля стебел  $P_{роз.}$  визначали за таких умов: діаметр отвору в пристосуванні – 10 мм; максимальна кількість стебел льону, які вкладалися в отвір пристосування, – 25 шт. Зусилля прикладалося до верхньої частини пристосування.

За допомогою програми для навчальної випробувальної машини МІ40КУ значення сили руйнування ударом  $P_{уд.}$  та обмежуючого розривного зусилля стебел  $P_{роз.}$  фіксувалися у вигляді графіків. Проводилося оброблення графіків для визначення середнього значення, що необхідно враховувати при проектуванні вальців із трапецієподібною формою зубців. Оброблення результатів експериментальних досліджень проводилося із використанням Mathcad 14.



а



б

Рис. 4 – Експериментальне визначення зусилля руйнування стебел льону олійного:

а – підготовлення стебел льону до експерименту;

б – стебла в робочій зоні моделі трапецієподібного зубця



а

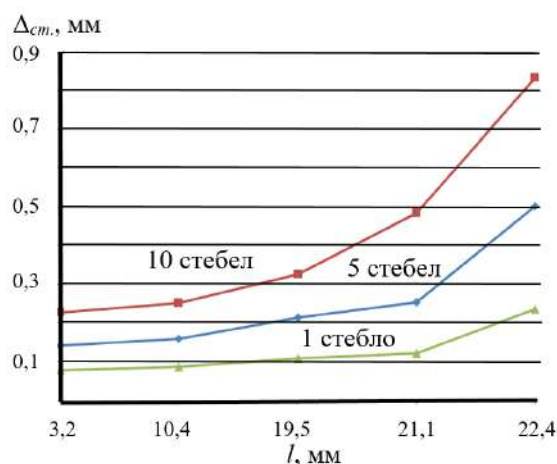


б

**Рис. 5** – Пристосування для визначення розривного зусилля стебел льону олійного (а) та підготовки стебел до експерименту (б)

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Теоретичний підхід до обґрунтування ударних навантажень, які мають місце внаслідок удару трапецієподібним зубцем по стеблу льону олійного, полягав у проведенні обчислень: статичного переміщення (рис. 6), статичного напруження та максимального динамічного напруження із врахуванням кількості стебел, які підлягали руйнуванню. Аналіз графіків (рис. 6) показує, що із збільшенням  $l$  відбувається зростання  $\Delta_{ст.}$ .

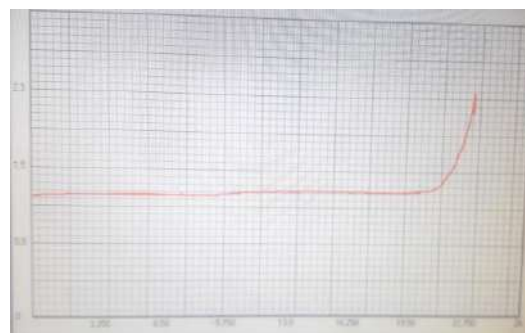


**Рис. 6** – Залежність статичного переміщення  $\Delta_{ст.}$  від  $l$  та кількості стебел льону олійного

Якщо врахувати, що ударне навантаження, що передається на тіло (стебло), прикладається

упродовж малого проміжку часу і спричиняє зміни у цьому тілі, то його значення необхідно визначати у кінцевій фазі руйнування стебла. При такій взаємодії у пружному тілі можливе виникнення напружено-деформованих станів.

Дані графіка (рис. 7) показують, що зусилля руйнування стебел льону олійного дорівнює 2,3 кН і не залежить від їх кількості, якщо вони розташовані товщиною в одне стебло. За цього значення зусилля при ударі ребром трапеції відбудеться руйнування дерев'янистої структури стебла льону.



**Рис. 7** – Результати визначення ударного зусилля  $P_{уд.}$

Якщо розглядати шар стебел льону довільної висоти, то цього ударного зусилля недостатньо. У зазорі між трапецієподібними зубцями (рис. 2) на шар стебел діють сили, які зумовлюють удар, згин та плющення. Зубці у формі трапецій забезпечують по чергову згин,



плющення та руйнування стебел внаслідок почергових ударів ребрами трапецій. Від інтенсивності та сили удару по стеблах залежить зменшення пружних властивостей, що вплине на процес формування рулону в пресувальній камері.

Удар трапецієподібного зубця по стеблу льону олійного забезпечує максимальне руйнування деревної складової – костриці та мінімальне пошкодження волокна.

Для забезпечення умови нерозривності стебел проведено обчислення динамічного коефіцієнта з урахуванням прогинання та кількості стебел. Аналіз графіків (рис. 8) показує, що значення динамічного коефіцієнта для 10 стебел менше від значення коефіцієнта для одного стебла чи шару із 5 стебел. Внаслідок обмеженої рухливості групи стебел льону значення динамічного коефіцієнта є меншим на кожному етапі фіксації значень. На значення динамічного коефіцієнта впливає наявність волокна у стеблах льону олійного, оскільки воно виконує армувальну роль у трубчатих стеблах.

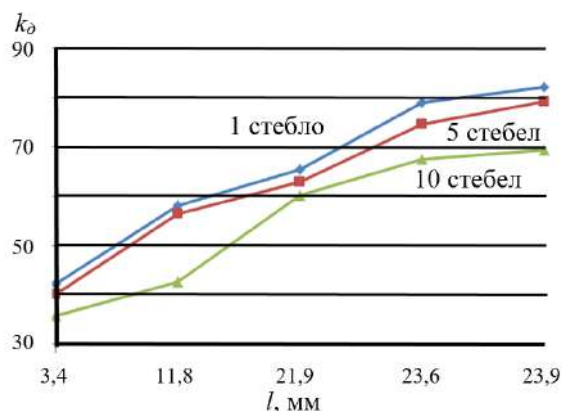


Рис. 8 – Графіки зміни динамічного коефіцієнта з урахуванням прогинання та кількості стебел льону олійного

Аналіз графіків (рис. 9) показує, що для 25 стебел розривне зусилля коливається у межах 15 кН. Отже, значення розривного зусилля є більшим за ударне зусилля, що є обов'язковою умовою для процесу зменшення пружних властивостей шару стебло-волокнистої маси, оскільки у цьому випадку буде збережене волокно льону. Відомо, що найбільше зменшуються пружні властивості після трьох проминань. Відповідно, у

декортикаторі необхідно встановити три пари м'яльних вальців. Якщо припустити, що кожен удар ребром трапеції відбуватиметься по незруйнованій ділянці стебла льону, то після взаємодії з трьома парами вальців відбудеться достатнє зменшення пружних властивостей шару стебел льону олійного.

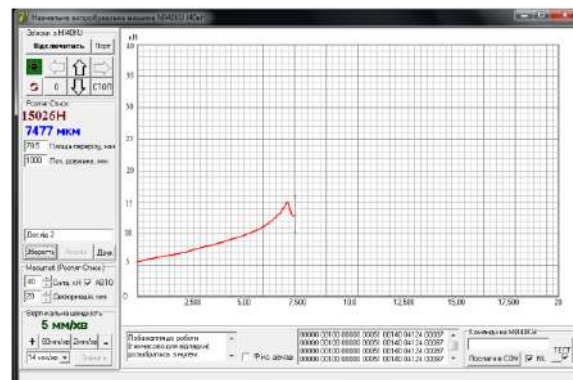


Рис. 9 – Визначення значення розривного зусилля  $P_{роз}$ .

## ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити умову нерозривності шару стебел льону олійного для їх оброблення м'яльними вальцями декортикатора. Розривне зусилля для волокна льону олійного становить 15 кН. За результатами моделювання взаємодії стебла льону з трапецієподібним зубцем визначено силу руйнування дерев'янистої структури стебла, максимальне значення якої – 2,3 кН. Одержані результати дозволяють обґрунтувати профіль зубців вальців, що забезпечують необхідне зменшення пружності стебел льону без руйнування волокна.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Didukh, V., Yageliuk, S., Artyukh, T., Albota, D., & Goliy, O. (2022). Decrease of elastic properties of oleaginous flax residues by decortication. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 67(2), 285-292. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-29>
- Dudarev, I., & Say, V. (2020). Development of resource-saving technology of linseed harvesting. *Journal of Natural Fibers*, 17(9), 1307-1316. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1558161>
- Goudenhoof, C., Siniscalco, D., Arnould, O., Bourmaud, A., Sire, O., Gorshkova, T., & Baley, C. (2018). Investigation of the mechanical properties of flax cell walls during plant development: the relation between performance and cell wall



- structure. *Fibers*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/fib6010006>
- Stamboulis, A., Baillie, C. A., & Peijs, T. (2001). Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(8), 1105-1115.
- Yaheliuk, S., Didukh, V., Busnyuk, V., Boyko, G., & Shubalyi, O. (2020). Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3), 361-368. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38>
- Альбота, Д. С., Бодак, М. В., & Дідух, В. Ф. (2022). Обґрунтування конструкції підбирача валків льону олійного для роздільної технології (*Design reasoning of oilseed flax windrow picker for two-phase harvesting*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 30-37. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.780>
- Дідух, В. Ф., & Альбота, Д. С. (2021). Визначення коефіцієнта пружності стебел льону олійного (*Determination of the coefficient of elasticity of oil flax stems*). *Сільськогосподарські машини*, 46, 21-29. <https://doi.org/10.36910/acm.vi46.487>
- Дідух, В. Ф., & Бодак, М. В. (2022). Вибір способу збирання льону олійного для збереження волокна (*The choice of the method of collecting oil flax to preserve the fiber*). *The 4th International scientific and practical conference «Eurasian scientific discussions»* (pp. 11-17). Barcelona: Barca Academy Publishing.
- Дідух, В. Ф., Ягелюк, С. В., Альбота, Д. С., & Бодак, М. В. (2021). Патент України 147778. *Машина для підбирання валків льону олійного (Machine for picking rolls of oilseed flax)*. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
- Онюх, Ю. М. (2019). *Удосконалення технології первинної переробки льону олійного, вирощеного в умовах Західного Полісся. Кваліфікаційна наукова робота як рукопис (Improvement of the technology of primary processing of oilseed flax grown in the conditions of the Western Polissia)* (Автореферат дис. канд. техні. наук). Херсонський національний технічний університет. Херсон.
- Хайліс, Г. А. (2004). *Механіка рослинних матеріалів (Mechanics of plant materials)*. Луцьк: РВВ ЛДТУ.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF SOIL COMPACTION ON ITS MAIN PROPERTIES

O. Nalobina<sup>1\*</sup>, M. Holotiuk<sup>1</sup>, V. Puts<sup>2</sup>

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

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

AGRICULTURAL MACHINES

AM  
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

### ABSTRACT

*The main problems of agriculture are: destruction of soil structure and soil compaction; water and wind erosion of soils; loss of humus; destruction of soil ecosystems. Soil degradation is a modern problem. One of the causes of soil degradation is compaction. Soil compaction in fields is a consequence of the use of heavy agricultural machinery. During crop cultivation, machine tractor units make 5–15 passes through the field, compacting the top and subsoil layers of the soil. During pre-sowing tillage and sowing, the running systems of the agricultural machines cover up to 80% of the field area. This leads to the deterioration of aeration, the conditions for the life of effective soil micro-organisms and the absorption of nutrients from the soil by plants, and as a result to the deterioration of the development of the root system of plants. The article presents the results of the evaluation of the density index of the grey-podzolized light loam soil at different depths in the field conditions of the farm of the Rivne region (Ukraine) and the influence of soil compaction on its physical and mechanical and biotic properties. The research was carried out as part of the first stage of the project, which is being implemented in accordance with cooperation agreements with leading agricultural enterprises of the Rivne region (Ukraine). The soil density indicator was determined in the track of wheeled tractors and a tractor with a crawler-track system after one, two, and three passes. It was found that the greatest increase in soil density was observed at a depth of 20–30 cm after the first tractor pass, regardless of the type of running system. After the second and especially after the third pass, compaction increases at different depths when tractors with different running systems are used. The effect of changes in soil density on its water permeability was evaluated. The influence of soil density on its biotic properties was studied.*

#### Key words:

soil,  
impact of equipment on soil,  
soil density,  
soil water permeability,  
soil biotic properties

#### Article history:

Received 30.04.2023

Accepted 01.06.2023

#### \*Corresponding author:

o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1017

#### To cite this article:

Nalobina, O., Holotiuk, M., & Puts, V. (2023). Study of the influence of soil compaction on its main properties. *Agricultural Machines*, 49, 39-45. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1017>

УДК 624.131.3

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ  
НА ЙОГО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ****О.О. Налобіна<sup>1\*</sup>, М.В. Голотюк<sup>1</sup>, В.С. Пуць<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування,  
Рівне, Україна<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна**АНОТАЦІЯ**

Основними проблемами землеробства є: руйнування структури та ущільнення ґрунту; водна та вітрова ерозія ґрунтів; втрата гумусу; руйнування ґрунтових екосистем. Деградація ґрунтів – це проблема сучасності. Одним із факторів, що спричиняє деградацію ґрунтів є ущільнення. Ущільнення ґрунту на полях є наслідком використання важкої сільськогосподарської техніки. Під час вирощування сільськогосподарських культур машинно-тракторні агрегати здійснюють 5–15 проходів полем, ущільнюючи орний та підорний шари ґрунту. Це спричиняє погіршення аерації, умов життєдіяльності ефективних ґрунтових мікроорганізмів та поглинання рослинами елементів живлення із ґрунту і, як наслідок, спричиняє погіршення розвитку кореневої системи рослин. У статті викладено результати оцінювання показників щільності сірого опідзоленого легкосуглинкового ґрунту на різних глибинах у польових умовах господарств Рівненської області (Україна) та впливу ущільнення ґрунту на його фізико-механічні та біотичні характеристики. Дослідження проходили в рамках першого етапу реалізації проекту, який виконується згідно з угодами щодо співпраці із провідними аграрними господарствами Рівненської області (Україна). Показник щільності ґрунту визначався в колії колісних тракторів та трактора з гусеничною ходовою системою після одного, двох і трьох проходів. Встановлено, що найбільше зростання щільності ґрунту спостерігається на глибині 20–30 см після першого проходу трактора незалежно від виду ходової системи. Після другого та, особливо, третього проходів ущільнення, за умови використання тракторів із різною ходовою системою, зростає на різних глибинах. Проведено оцінювання впливу зміни щільності ґрунту на його водопроникність. Досліджено вплив щільності ґрунту на його біотичні характеристики.

**Ключові слова:**

ґрунт,  
вплив техніки на ґрунт,  
щільність ґрунту,  
водопроникність ґрунту,  
біотичні характеристики ґрунту

**Історія публікації:**

Отримано 30.04.2023

Затверджено 01.06.2023

**\*Автор для листування:**

o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1017

**Цитувати цю статтю:**

Налобіна, О. О., Голотюк, М. В., & Пуць, В. С. (2023). Дослідження впливу ущільнення ґрунту на його основні характеристики. *Сільськогосподарські машини*, 49, 39-45. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1017>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ущільнення ґрунту – це процес, який зменшує порожнечу між його частинками та наближає їх одна до одної, внаслідок чого збільшується щільність. Здатність ґрунту чинити опір ущільненню залежить від його структури і вологості. Наприклад, ущільнення лише незначною мірою впливає на ґрунти з піщаним механічним складом (Horn et al., 1995). Сприйнятливості ґрунту до ущільнення зменшується зі збільшенням вмісту органічної речовини. Це сприяє стійкості ґрунту до деформації або підвищує його еластичність. Ущільнення ґрунту збільшується за його підвищеної вологості, що характерно для глинистих ґрунтів (Smith et al., 1997).

Ущільнення ґрунту може відбуватися природним шляхом внаслідок висихання та під впливом низьких температур або штучно – внаслідок впливу важкої техніки (Batey, 2009). Механізація рослинництва характеризується багаторазовими проходками техніки полем. Це спричиняє ущільнення ґрунту і, як наслідок, погіршення фізико-механічних і агрофізичних властивостей ґрунту. Ступінь ущільнення ґрунту технічними засобами визначається масою машино-тракторного агрегата та міцністю ґрунтів (Yavuzcan et al., 2005). Міцність ґрунту залежить від вмісту у ньому води та органічних речовин. Важливими параметрами, що впливають на ущільнення ґрунту, як зазначають дослідники, також є кількість та розмір шин сільськогосподарських тракторів, що рухаються полем, а також швидкість їхньої взаємодії з ґрунтом (Sakai et al., 2008). Ущільнення ґрунту зростає зі збільшенням кількості проходів транспортних засобів полем. Зокрема, найбільше ущільнення відбувається після двох проходів техніки. Найбільше ущільнення, зазвичай, має місце на глибині 10–30 см у вологому ґрунті (Aloui & Disereus, 2011).

Ущільнення впливає на пористість ґрунту, зменшуючи макропори до мезопор, а потім – до мікропор (Vetten, 2014). Зменшення макропористості ґрунту знижує гідравлічну провідність та повітропроникність ґрунту. Ущільнення ґрунту зменшує рух повітря і води внаслідок збільшення насипної щільності та зменшення об'єму макропор. Крім того, зменшення пористості знижує швидкість інфільтрації води і повітропроникність ґрунту,

а це впливає на кругообіг вуглецю та азоту в ньому (Nawaz et al., 2013).

Дослідження впливу ущільнення ґрунту на його якість є актуальними на сьогодні. Зокрема, це пов'язано із застосуванням важкої сільськогосподарської техніки масою до 80 т. Великогабаритна техніка дозволяє вчасно обробляти значні площі, висівати культури та збирати урожай, зводити до мінімуму його втрати, що пов'язані з погодними умовами. Ширина захвату сільськогосподарських машин зростає від одного-двох рядків до 20 та більше (наприклад, сівалка Kinze 3700 – 24-х рядна), що спричиняє значне ущільнення ґрунту.

Результати досліджень явища ущільнення ґрунту висвітлені в багатьох наукових працях. Дослідники намагалися вивчити та кількісно оцінити основні фізичні, а також біотичні властивості різних типів ґрунтів за різних режимів землекористування. Зокрема, увага зверталася на фактори, які характеризують процес ущільнення ґрунтів. Також науковці ставили за мету кількісно оцінити широкий спектр параметрів, якими можна оцінити наслідки ущільнення ґрунту, встановити їхній можливий взаємозв'язок із практикою землекористування.

**Мета дослідження** – дослідити у польових умовах вплив ущільнення ґрунту на фізико-механічні та біотичні характеристики ґрунту, що дозволить сформувати базу даних по агрогосподарствах Рівненської області (Україна) для подальшої формалізації процесу ущільнення ґрунту та створення математичних моделей, які розкривають сутність цього процесу.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Під час дослідження використовували загальноприйняті методики (Гаськевич та ін., 2021), а саме, вимірювання щільності ґрунту проводили за методом Качинського. Для дослідів використовували бур (сталевий циліндр), об'єм циліндра – 100 см<sup>3</sup>. На місці відбирання проб зрізали рослинність та вирівнювали поверхню ґрунту. В отвір спрямовувача закладали циліндр, який різким вертикальним рухом втулки вдавлювали у ґрунт на всю його висоту. Для кращого занурення циліндра у ґрунт стінки циліндра попередньо змазували вазеліном. У тих випадках, коли зразки відбирали на сухих та

дуже щільних ґрунтах, то по головці втулки вдарили дерев'яним молотком. Циліндр після занурення повністю заповнювали ґрунтом без його ущільнення. Якщо циліндр під час занурення в ґрунт перекошувався, зразок вибраковували та відбирали новий. Після занурення циліндра у ґрунт спрямовувач знімали. Виступ ґрунту над тильним краєм циліндра зрізали гострим ножом та закривали кришкою. Навколо циліндра обкопували ґрунт з усіх боків ножом або лопаткою. Ґрунт під циліндром підрізали таким чином, щоб залишався виступ ґрунту. Циліндр із ґрунтом піднімали, перевертали кришкою донизу і гострим ножом зрізали надлишок ґрунту врівень із ріжучим краєм циліндра, не допускаючи сколу ґрунту. Циліндр із зовні очищали від ґрунту, знімали кришку і ставили верхнім неріжучим краєм над відкритим алюмінієвим буюсом. Ґрунт виштовхували за допомогою спеціального шомпола, а залишки всередині циліндра відколювали та зсипали у цей же буюс. Виштовхували ґрунт із циліндра в буюс над аркушем чистого паперу. Частинки ґрунту, що впали на аркуш, зсипали у буюс, після чого його закривали кришкою та упаковували (Гаськевич та ін., 2021).

Кількість дощових черв'яків у ґрунті визначали шляхом розкопування та огляду проб ґрунту. Розмір зразків ґрунту, що підлягали огляду, приймався 50×50 см. Зразки ґрунту викопували лопатою та вкладали на плівку. Ґрунт перебирали вручну, черв'яків вкладали в контейнер для визначення їх кількості. Водопроникність ґрунту у польових умовах визначали з використанням методу рам (Гаськевич та ін., 2021).



На підставі аналізу літературних джерел були сформульовані концептуальні висновки для перевіряння впливу ущільнення ґрунту на його фізичні та біотичні властивості:

- передбачається, що опір ґрунту, який досліджується, проникненню води позитивно корелюватиме з ущільненням;
- на ущільнених ділянках ґрунту зменшується вміст органічних речовин;
- ущільнення ґрунту спричиняє зменшення кількості живих організмів у ньому;
- проникність вологи зменшується через ущільнення ґрунту;
- щільність позитивно корелюватиме з числом проходів трактора.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження проводилися упродовж двох років у господарствах Рівненської області (Україна) у польових умовах. Ґрунт на експериментальних ділянках господарств – сірий опідзолений легкосуглинковий.

У процесі виконання польових робіт ущільнення ґрунту відбувалося колісними та гусеничними тракторами. У господарствах використовувалися трактори:

- Claas 850 Axion (потужність – 171 кВт, маса – 8096 кг);
- John Deere 6195M (потужність – 151 кВт, маса – 7500 кг);
- Fendt Vario 900MT (потужність – 317 кВт, маса – 15169 кг).

Щільність ґрунту визначалася як за загальним фоном, так й після проходження тракторів у центральній зоні сліду (рис. 1). Результати досліджень подані в таблиці.



Рис. 1 – Ущільнення ґрунту після проходження сільськогосподарської техніки

Таблиця – Середні значення щільності ґрунту після першого, другого та третього проходів тракторів

Глибина ґрунту	Щільність ґрунту, г/см <sup>3</sup>									
	початкова	після проходження трактора Claas 850 Axion			після проходження трактора John Deere 6195M			після проходження трактора Fendt Vario 900 MT		
		кількість проходів			кількість проходів			кількість проходів		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0–10	1,143	1,288	1,403	1,422	1,249	1,398	1,401	1,303	1,427	1,438
10–20	1,185	1,304	1,411	1,430	1,298	1,401	1,426	1,341	1,436	1,459
20–30	1,166	1,336	1,450	1,471	1,322	1,422	1,443	1,369	1,456	1,465
30–40	1,143	1,249	1,448	1,462	1,203	1,418	1,437	1,251	1,361	1,409
40–50	1,140	1,216	1,458	1,469	1,212	1,407	1,439	1,261	1,351	1,401

Під час досліджень упродовж другого року визначені закономірності зростання (у відсотках) щільності ґрунту на різній глибині залежно від кількості проходів тракторів (рис. 2). Встановлено, що ущільнення ґрунту збільшилося на 6,60–7,80% порівняно з першим роком досліджень для випадку використання колісних тракторів та на 6,47–7,92% – у випадку використання гусеничного трактора значно більшої маси. Причому, найбільший відсоток зростання ущільнення спостерігався на глибині 20–30 см після першого проходу та 30–40 см – після другого й третього проходів.

Крім того, для генетичної, агрономічної та меліоративної характеристики ґрунту важливо знати його водопроникність, від якої залежить

ступінь поглинання ґрунтом атмосферних опадів або поливних вод, формування поверхневого та внутрішнього ґрунтового стоку води, інтенсивність процесів водної ерозії, формування генетичних горизонтів тощо (Гаськевич та ін., 2021). Ущільнення ґрунту обмежує рух води вниз, що спричиняє перенасичення водою верхніх шарів ґрунту, а це може викликати нестачу кисню для коренів рослин (рис. 3) (Агроном, 2020). Результати досліджень зміни водопроникності ґрунту від його щільності представлено на рис. 4. Водопроникність – мінлива характеристика, яка залежить від багатьох факторів, а саме: механічного складу ґрунту, його структурного стану, пористості, щільності, вологості та інших властивостей.

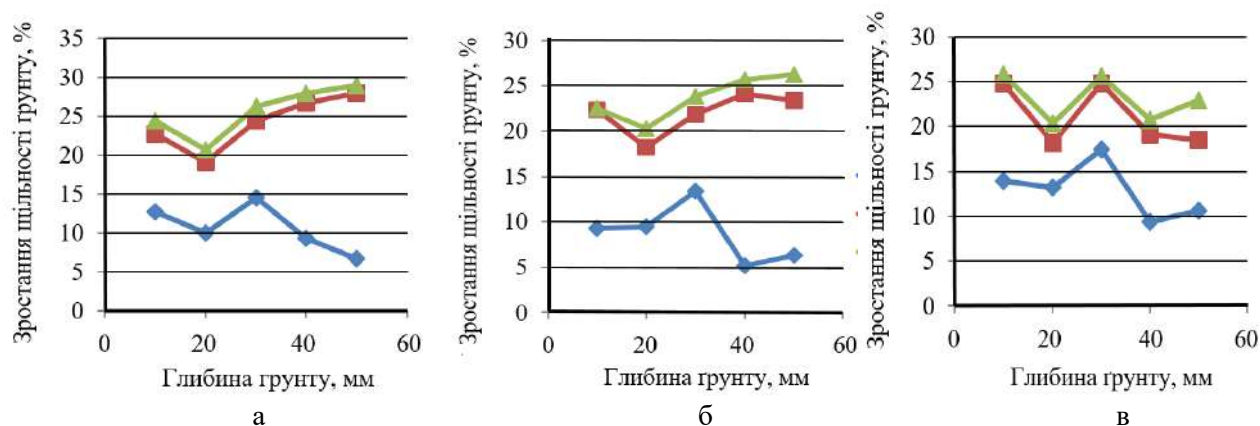


Рис. 2 – Закономірності зростання щільності ґрунту на різній глибині залежно від кількості проходів тракторів Claas 850 Axion (а), John Deere 6195M (б) та Fendt Vario 900 MT (в):

— 1 – без проходу трактора; — 2 – після 1 проходу трактора; — 3 – після 2 проходів трактора



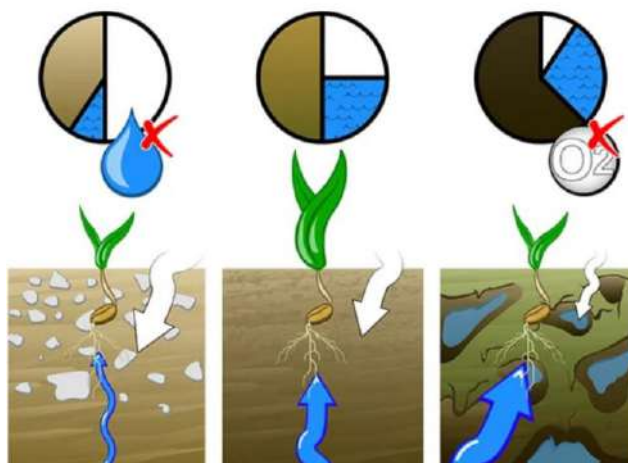


Рис. 3 – Аерація ґрунту (Агроном, 2020)

Для формалізації процесу ущільнення ґрунту необхідно враховувати вплив щільності ґрунту на біоту. З цією метою встановлено закономірність впливу щільності ґрунту на кількість черв'яків у ньому (рис. 5). Зі збільшенням кількості проходів тракторів

зменшується кількість живих організмів (черв'яків) у ґрунті. Після трьох проходів тракторів Claas 850 Axion та John Deere 6195M кількість черв'яків зменшилася на 56,25%, а після трьох проходів трактора Fendt Vario 900 MT – зменшення черв'яків відбулося на 62,5%.

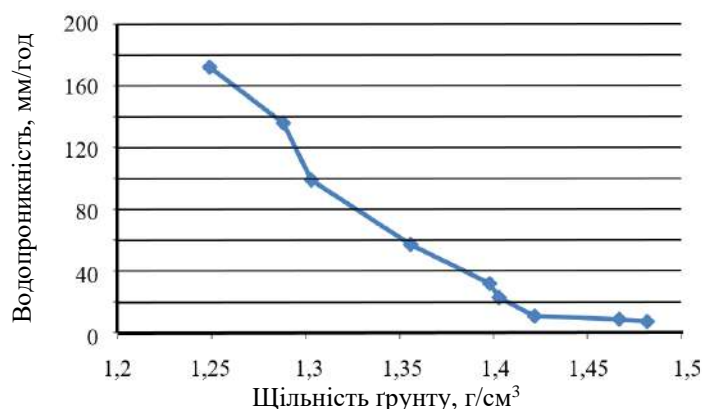


Рис. 4 – Графік зміни водопроникності ґрунту від його щільності



Рис. 5 – Кількість черв'яків на 1 м<sup>2</sup> ґрунту залежно від його щільності (після триразового проходження тракторів)

**ВИСНОВКИ**

За результатами дослідження впливу ущільнення ґрунту на його фізико-механічні та біотичні характеристики встановлено, що:

- щільність ґрунту збільшується із збільшенням кількості проходів тракторів;

- найбільше зростання щільності ґрунту спостерігається на глибині 20–30 см після першого проходження трактора незалежно від виду ходової системи;

- після третього проходження трактора закономірності зростання щільності ґрунту різні для тракторів із колісною та гусеничною ходовими системами;

- найбільша щільність ґрунту після проходження тракторів: на глибині 40–50 см – для колісного трактора; на глибині 30–40 см – для гусеничного трактора з гумо-еластичною гусеницею;

- зі збільшенням щільності ґрунту його водопроникність зменшується;

- зі збільшенням кількості проходів трактора полем зменшується кількість живих організмів (черв'яків) у ґрунті; після трьох проходів тракторів Claas 850 Axion та John Deere 6195M кількість черв'яків зменшилася на 56,25%, а трактора Fendt Varjo 900 MT – на 62,5%.

**СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

- Alaoui, A., & Diserens, E. (2011). Changes in soil structure following passage of a tracked heavy machine. *Geoderma*, 163(3-4), 283-290.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345.
- Horn, R., Domzłal, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35(1), 23-36.
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Sakai, H., Nordfjell, T., Suadcani, K., Talbot, B., & Bøllehuus, E. (2008). Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 29(1), 15-27.
- Smith, C., Johnston, M., & Lorentz, S. (1997). Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. *Soil and Tillage Research*, 41(1), 53-73.
- Vetten, L. D. (2014). *A comparison of methods assessing soil compaction on black vertosols*. South-Eastern Queensland, Australia.
- Yavuzcan, H. G., Matthies, D., & Auernhammer, H. (2005). Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil and Tillage Research*, 84(2), 200-215.
- Агроном. (2020). Як щільність ґрунту впливає на урожайність с.-г. культур (How the density of the soil affects the yield of agricultural crops). Retrieved April 2, 2023, from <https://www.agronom.com.ua/yak-shhilnist-gruntu-vplyvaye-na-urozhajnist-s-g-kultur/>
- Гаськевич, В. Г., Папіш, І. Я., & Телегуз, О. Г. (2021). *Фізика ґрунтів (Soil physics)*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка.

## DAMAGE TO POTATOES DURING TRANSPORTATION

A. Shymko<sup>1\*</sup>, O. Bundza<sup>1</sup>, V. Martyniuk<sup>2</sup><sup>1</sup>National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine<sup>2</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

## ABSTRACT

Potato is a staple food and the most popular crop in agricultural production. Ukraine has favorable soil and climatic conditions for growing this crop, but the efficiency of its production remains low compared to the leading producers in Europe and the world. The efficiency of the industry depends on many factors, including the preservation of the harvested crop. Potatoes in storage must be free from mechanical damage that could lead to the development of fungal and bacterial pathogens in the tubers. Damage to the tubers causes significant economic losses for producers of this product, as it loses its marketable appearance and deteriorates quickly. Another problem that causes losses to potato growers is the appearance of black spot. It has been found that the development of black spot depends not only on the amount of mechanical impact, but also on the physical and biochemical characteristics of the potato tubers. Reducing mechanical damage to the tubers is the best way to avoid black spot formation. During harvesting, potato tubers interact with the working bodies of the agricultural machines and are damaged. In particular, one of the causes of mechanical damage is the impact of the tubers during loading into vehicles, transport and unloading. Finding ways to improve the process of transporting potato tubers is an urgent task. The article presents the results of experimental studies aimed at identifying the main types of mechanical damage caused by impact loads during the loading of potatoes into the body of a vehicle, their subsequent transport and unloading. It was found that the most frequently observed type of potato damage is peeling of the skin on the tubers – in 9.7% of cases. In order to reduce the mechanical damage of potato tubers during unloading from agricultural machines, it is proposed to equip the dumpers with additional shock-absorbing equipment. The modernized design of the body for the transport of potato tubers includes adjustable movable vertical partitions and a sliding rear board. The modernization of the body makes it possible to reduce the rate of spillage of potato tubers from the body due to the gradual and independent opening of the partitions.

**Key words:**

potato,  
mechanical damage to potatoes,  
transport of potatoes,  
tipper body,  
unloading potatoes

**Article history:**

Received 30.04.2023

Accepted 01.06.2023

**\*Corresponding author:**

a.v.shymko@nuwm.edu.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1018

**To cite this article:**

Shymko, A., Bundza, O., & Martyniuk, V. (2023). Damage to potatoes during transportation. *Agricultural Machines*, 49, 46-52. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1018>

УДК 631.558.4

**ПОШКОДЖЕННЯ БУЛЬБ КАРТОПЛІ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ****А.В. Шимко<sup>1\*</sup>, О.З. Бундза<sup>1</sup>, В.Л. Мартинюк<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування,  
Рівне, Україна<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна**АНОТАЦІЯ**

Картопля – це один із основних продуктів харчування та є найпопулярнішою культурою в агровиробництві. Україна має сприятливі ґрунтово-кліматичні умови для вирощування цієї культури, але ефективність її виробництва, порівняно з провідними виробниками Європи та світу, залишається низькою. Ефективність галузі залежить від багатьох факторів, зокрема збереження зібраного урожаю. Картопля, що закладається на зберігання, не повинна мати механічних пошкоджень, які спричиняють розвиток у бульбах збудників грибкових та бактеріальних хвороб. Під час збирання бульби картоплі взаємодіють із робочими органами машин і зазнають пошкоджень. Зокрема, однією з причин механічного пошкодження є удар бульб під час завантаження їх у транспортні засоби, перевезення та розвантаження. Пошук шляхів удосконалення процесу транспортування бульб картоплі є актуальним завданням. У статті викладено результати експериментальних досліджень, що спрямовані на виявлення основних видів механічних пошкоджень, які є наслідком ударних навантажень під час завантаження картоплі у кузов транспортного засобу, подальшого її транспортування та вивантаження. Встановлено, що найчастіше спостерігається такий вид пошкодження як здирання шкірки на бульбах – у 9,7%. З метою зменшення механічного пошкодження бульб картоплі під час розвантаження самоскидних кузовів технічних засобів запропоновано оснащувати кузов додатковим обладнанням, що гасить ударні навантаження. Модернізована конструкція кузова транспортного засобу для перевезення бульб картоплі містить регульовані рухомі вертикальні перегородки та розсувний задній борт. Модернізація кузова дозволяє зменшити швидкість висипання бульб картоплі з кузова внаслідок поступового і незалежного відкриття перегородок. Крім того, конструкція заднього борта унеможливує удар бульб по поверхні ґрунту.

**Ключові слова:**

картопля,  
механічні пошкодження  
картоплі,  
транспортування картоплі,  
самоскидний кузов,  
вивантаження картоплі

**Історія публікації:**

Отримано 30.04.2023

Затверджено 01.06.2023

**\*Автор для листування:**

a.v.shymko@nuwm.edu.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1018

**Цитувати цю статтю:**

Шимко, А. В., Бундза, О. З., & Мартинюк, В. Л. (2023). Пошкодження бульб картоплі під час транспортування. Сільськогосподарські машини, 49, 46-52. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1018>

### СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Україна є одним із найбільших виробників картоплі у світі. Зокрема, господарствами усіх форм власності було зібрано у 2020 році 20837,99 тис т картоплі, а в 2021 році – зібрано 21356,47 тис т картоплі (*Державна служба статистики України, 2023*).

У технологічному процесі виробництва картоплі найбільш трудо- та енерговитратною операцією є механізоване збирання картоплі. На збирання припадає 40–60% енерговитрат та 70% трудовитрат виробництва картоплі. Висока ефективність галузі картоплярства можлива лише за умови забезпечення повної механізації технологічних процесів на всіх етапах виробництва картоплі: підготовки поля, внесення добрив, висаджування картоплі, догляд за культурою, збирання картоплі, її транспортування та зберігання. Транспортування бульб картоплі спричиняє механічні пошкодження бульб, ступінь яких залежить від висоти падіння бульб та кількості їх падінь. Пошкодження бульб зумовлюють значні економічні збитки виробників цієї продукції, оскільки вона втрачає товарний вигляд і швидко псується.

Ще однією проблемою, що спричиняє збитки виробників картоплі, є поява чорних плям. Науковцями проведені дослідження з виявлення причин утворення чорних плям та впливу механічних пошкоджень бульб на розвиток чорної плямистості (*Molema, 1999*). Зокрема, встановлено, що розвиток чорних плям залежить не лише від сили механічних впливів, а й від фізичних, фізіологічних та

біохімічних характеристик бульб картоплі. Отже, зменшення механічних пошкоджень бульб – це найкращий спосіб уникнути утворення чорних плям на картоплі. Відсоток пошкодження бульб на етапах збирання, транспортування та первинного перероблення картоплі від загального їх пошкодження подано в **таблиці** (*Bouman, 1994*). Аналіз даних **таблиці** показує, що найбільший відсоток пошкодження бульб картоплі (33,1%) спостерігається під час її перероблення.

Дослідженням пошкодження картоплі та інших овочів під час транспортування, завантаження та вивантаження присвячено наукові праці (*O'Brian, 1972; Herold et al., 2001; Rady & Soliman, 2015; Загорянський та ін., 2018*). Зокрема, встановлено основні види механічних пошкоджень бульб картоплі у процесі взаємодії із робочими органами сільськогосподарських машин (*Заводнов, 2002*) (**рис. 1**): потемніння м'якоті (69,4%), тріщини (13,3%), здирання шкірки (8,4%),



**Рис. 1** – Розподіл механічних пошкоджень бульб картоплі

**Таблиця** – Пошкодження бульб картоплі під час технологічних операцій (*Bouman, 1994*)

Етапи збирання, транспортування та первинного перероблення картоплі	Пошкодження бульб, %
1	2
Збирання урожаю	14,7
Транспортування та проміжне зберігання	0,5
Транспортування стрічковим конвеєром та переміщення стаціонарним навантажувачом	1,5
Зберігання у сховищі	20,8
Відвантаження зі сховища	12,2
Транспортування вантажним автомобілем	14,2
Розвантаження вантажного автомобіля	3,0
Первинне перероблення (сортування, пакування)	33,1

Механічні пошкодження бульб картоплі спричиняють скорочення терміну зберігання продукції, що пояснюється проникненням і розвитком у бульбах збудників грибкових і бактеріальних хвороб. Отже, пошук шляхів удосконалення процесу транспортування бульб картоплі є актуальним завданням.

**Мета дослідження** – удосконалити конструкцію кузова технічного засобу для транспортування картоплі, яка б забезпечувала зменшення пошкодження бульб картоплі.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Під час дослідження використовувався метод спостереження. Оброблення даних проводили згідно з методикою статистичного оброблення даних.

Дослідження передбачали визначення основних видів пошкоджень, які отримують бульби картоплі під час завантаження у транспортні засоби та вивантаження із них. Дослідження проводили упродовж двох років у період збирання картоплі. Статистичне оброблення даних полягало у визначенні коефіцієнта варіації:

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де  $v$  – коефіцієнт варіації;  $S$  – середнє квадратичне відхилення;  $\bar{x}$  – середнє значення параметра, що досліджується.

Середнє квадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} , \quad (2)$$

де  $n$  – число спостережень;  $x$  – значення параметра, що досліджується.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вивезення картоплі з поля проводиться самоскидними вантажними автомобілями, вантажними автомобілями з самоскидними причепами чи напівпричепами або тракторним транспортом (із самоскидними причепами чи напівпричепами) (**рис. 2**).

Конструкції самоскидних транспортних засобів частково відповідають потребам

агропромислового комплексу. Це можна пояснити тим, що вони призначені для перевезення вантажів, які не потребують особливих умов завантаження /розвантаження, а також транспортування. Транспортні засоби, що використовуються для перевезення урожаю культур, які мають бути захищені від механічних пошкоджень внаслідок падіння, надмірного стискання та тертя, потребують удосконалення, зокрема шляхом їхнього оснащення додатковим устаткуванням. Відомі конструкції пристроїв, які дозволяють зменшити кількість таких пошкоджень, зокрема, прогумовані бічні поверхні кузова, рухоме днище тощо. Наприклад, у конструкції картоплезбирального комбайна SE 75-20 (виробник – Grimme) передбачена випускна воронка з гасником падіння, що забезпечує наповнення контейнерів та транспортних засобів без пошкодження бульб. Гідравлічний пристрій повертає воронку із потоком картоплі та дозволяє наповнювати високі транспортні засоби за всією шириною бункера (**рис. 3**).

Упродовж двох сезонів проводилися дослідження механічних пошкоджень бульб картоплі, які фіксували органолептичним методом. Бульби для досліджень відбирали як із кузова, так й після їх вивантаження із кузова. Результати досліджень представлено на **рис. 4**. З метою оцінювання мінливості ознак обчислювався коефіцієнт варіації, значення якого коливалося в межах 4,7–5,3%. Зображення механічних пошкоджень картоплі подано на **рис. 5**.

Для зменшення пошкодження бульб картоплі під час розвантаження самоскидних кузовів технічних засобів запропоновано встановити у кузові додаткове обладнання. За прототип вибрано відому конструкцію (*Успенский и др., 2011*). Кузов транспортного засобу містить одну поздовжню перегородку та шість поперечних перегородок (**рис. 6**). Під час аналізу конструкції кузова виявлено недоліки:

- перегородки, за умови перекидання кузова, відкриваються під вагою шару бульб, які ковзають днищем кузова; рівномірність вивантаження бульб може бути забезпечена лише за умови, якщо бульби будуть одного розміру;

- усі перегородки кузова відкриваються практично одночасно під час перекидання кузова, внаслідок чого на крайню перегородку



(зі сторони вивантаження кузова) буде діяти найбільша сила тиску, що спричинить прискорення потоку бульб і, відповідно, зростання сили удару при їх падінні, що недопустимо.

З метою усунення зазначених недоліків пропонується виконати перегородки з окремими модулями керування, що містять гідроциліндри, які з'єднано із гідросистемою трактора. Це дозволяє регулювати кут відхилення перегородок від вертикальної

площини. Крім того, конструкція дозволяє проводити незалежне відкриття (закриття) перегородок, що забезпечує рівномірний вихід потоку бульб із значно меншим прискоренням.

Задній борт має збірну конструкцію, що містить два листи, між якими розташовано лист, який покритий брезентовим полотном, що висувається з борта спрямовувачами. Схема запропонованого модернізованого кузова для транспортування картоплі подана на **рис. 7**.



**Рис. 2** – Транспортний засіб для перевезення картоплі



**Рис. 3** – Картоплезбиральний комбайн SE 75-20 з гасником падіння картоплі



**Рис. 4** – Механічні пошкодження бульб картоплі:

1 – пошкодження шкірки; 2 – почорніння м'якоті; 3 – тріщини та порізи; 4 – пошкодження м'якоті



Рис. 5 – Типові пошкодження бульб картоплі



Рис. 6 – Удосконалений кузов ТТА 2 ПТС-4:

1 – поперечні перегородки (рухливі); 2 – поздовжня перегородка; 3 – осі обертання перегородок;  
4 – задній відкидний борт; 5 – днище кузова; 6 – передній борт

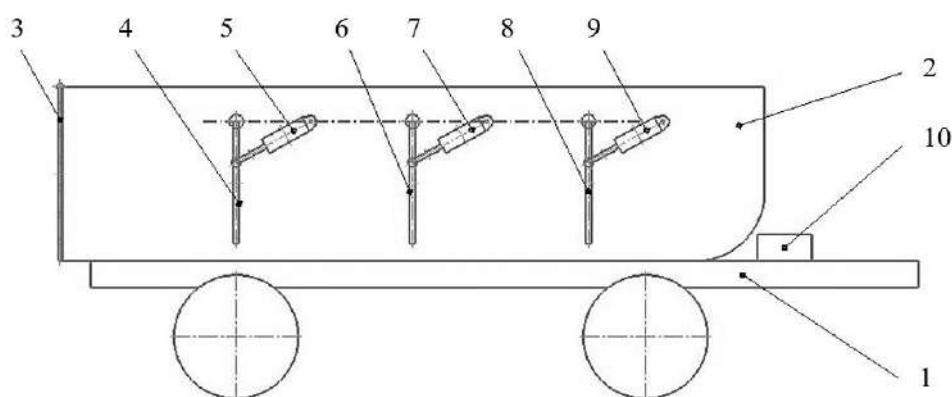


Рис. 7 – Схема модернізованого кузова:

1 – рама; 2 – кузов; 3 – задній відкидний борт; 4, 6, 8 – регульовані перегородки;  
5, 7, 9 – гідроциліндри керування перегородками; 10 – корпус гідроциліндра

**ВИСНОВКИ**

Експериментальним шляхом доведено, що на етапі транспортування бульб картоплі вони зазнають механічних пошкоджень, зокрема: пошкодження шкірки, почорніння м'якоти, тріщини та порізи, пошкодження м'якоти. Найчастіше спостерігається пошкодження шкірки бульб – у 9,7% випадків.

Для зменшення механічних пошкоджень бульб картоплі запропоновано модернізовану конструкцію кузова транспортного засобу, яка відрізняється від відомих конструкцій регульованими перегородками.

**СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

- Bouman, F. J. A. (1994). Rotating and accumulating savings and credit associations: A development perspective. *World Development*, 23(3), 371-384. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(94\)00141-K](https://doi.org/10.1016/0305-750X(94)00141-K)
- Herold, B., Geyer, M., & Studman, C. J., (2001). Fruit contact pressure distributions – equipment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32, 167-179.
- Molema, G. J. (1999). *Mechanical force and subcutaneous tissue discolouration in potato* [PhD Thesis]. Wageningen University, Wageningen.
- O'Brian, M. (1972). Bulk handling and transportation of fruits and vegetables. *Proceedings of the International Horticultural Congress* (pp. 405-411). Tel-Aviv.
- Rady, A. M., & Soliman, N. (2015). Evaluation of mechanical damage of Lady Rosetta potato tubers using different methods. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 5(2), 125-148. <https://doi.org/10.1504/IJPTI.2015.074322>
- Державна служба статистики України. (2023). *Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур за їх видами та по регіонах (Areas, gross harvests and productivity of agricultural crops by their types and by regions)*. Retrieved April 26, 2023, from <https://www.ukrstat.gov.ua/>
- Заводнов, С. В. (2002). *Исследования взаимодействия клубней картофеля с рабочими органами сельскохозяйственных машин (Study of the interaction of potato tubers with the working bodies of agricultural machines)* [Дисертація канд. техн. наук]. Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина, Москва.
- Загорянский, В. Г., Гайкова, Т. В., Хорольский, В. Л., & Кузев, І. О. (2018). Збереження якісних характеристик картоплі в післязбиральний період шляхом удосконалення процесу транспортування і супутніх операцій (*Preservation of quality characteristics of potatoes in the post-harvest period by improving the transportation process and related operations*). *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 4, 81-86.
- Успенский, И. А., Булатов, Е. П., Рембалович, Г. К., Кокорев, Г. Д., & Юхин, И. А. (2011). Патент РФ 105233. *Самосвальный кузов транспортного средства для перевозки легкоповреждаемой сельскохозяйственной продукции (Dump body of a vehicle for the transportation of easily damaged agricultural products)*. Москва: Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ.

## TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MANUFACTURING FUEL BRIQUETTES

M. Fomych\*

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---



### ABSTRACT

*In Ukraine and the in world, there is a need to utilize the biomass of the stems of agricultural crops, the productive part of which is grain. Such agricultural crops are: wheat, corn, sunflower, linseed, etc. The volume of cultivation of these crops is constantly growing, so the problem of processing their stems is becoming extremely urgent. Typically, the biomass from stems of agricultural crops is crushed and left in the soil or burned. Scientists have proven that the biomass of the stems of agricultural crops has great potential for the production of a wide range of goods. The most rational way of processing the biomass from the stems of agricultural crops is to produce various types of solid fuel. The stem of the crop can and should be used as raw material for the production of fuel materials, as this will contribute to ensuring Ukraine's energy independence. The purpose of the research is to analyze the technologies and equipment for the production of fuel briquettes from the stems of agricultural crops, to determine the most promising of them. The article analyzes the types of fuel briquettes, their physical and mechanical properties, as well as technologies and equipment for their production from the biomass of the stems of agricultural crops. It was established that it is most expedient to manufacture briquettes of the RUF and NESTRO (NIELSEN) type due to their low cost and good physical and mechanical properties. A complex of equipment for the production of fuel materials for the production of briquettes of the RUF or NESTRO (NIELSEN) type is also offered. These types of briquette production complexes can be located on the territory of agricultural producers, which enables processing of stems into fuel briquettes directly on the spot.*

#### **Key words:**

biomass,  
stems,  
fuel briquettes,  
solid fuel,  
properties of fuel briquettes

#### **Article history:**

Received 02.05.2023

Accepted 02.06.2023

#### **\*Corresponding author:**

mykhailo.fo@gmail.com

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1020

#### **To cite this article:**

Fomych, M. (2023). Technologies and equipment for manufacturing fuel briquettes. *Agricultural Machines*, 49, 53-59. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1020>

УДК 631.572

**ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ****М.І. Фомич\****Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

*В Україні та світі постала потреба утилізації біомаси стебел сільськогосподарських культур, продуктивною частиною яких є зерно. Такими сільськогосподарськими культурами є пшениця, кукурудза, соняшник, льон олійних тощо. Обсяги вирощування цих культур постійно зростають, тому проблема перероблення їх стебел стає надзвичайно актуальною. Як правило, біомасу стебел сільськогосподарських культур подрібнюють та залишають у ґрунті або ж спалюють. Науковцями доведено, що біомаса стебел сільськогосподарських культур має великий потенціал для виробництва широкого асортименту товарів. Найбільш раціональним напрямом перероблення біомаси стебел сільськогосподарських культур є виробництво різних видів твердого палива. Стеблову частину урожаю можна та потрібно використовувати як сировину для виготовлення паливних матеріалів, оскільки це сприятиме забезпеченню енергетичної незалежності України. Мета дослідження – проаналізувати технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів із стебел сільськогосподарських культур, визначити найбільш перспективні із них. У статті проаналізовані типи паливних брикетів, їх фізико-механічні властивості, а також технології та обладнання для їх виготовлення з біомаси стебел сільськогосподарських культур. Встановлено, що найбільш доцільно виготовляти брикети типу RUF та NESTRO (NIELSEN) внаслідок їх низької вартості і хороших фізико-механічних властивостей. Також запропоновано комплекс обладнання для виробництва паливних матеріалів для виготовлення брикетів типу RUF або NESTRO (NIELSEN). Комплекси із виготовлення брикетів цих типів можна розташовувати на території виробників сільгосппродукції, що дозволить переробляти стеблову масу в паливні брикети безпосередньо на місці.*

**Ключові слова:**

біомаса,  
стебла,  
паливні брикети,  
тверде паливо,  
характеристика паливних  
брикетів

**Історія публікації:**

Отримано 02.05.2023  
Затверджено 02.06.2023

**\*Автор для листування:**

mykhailo.fo@gmail.com

**DOI:** 10.36910/acm.vi49.1020**Цитувати цю статтю:**

Фомич, М. І. (2023). Технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів. *Сільськогосподарські машини*, 49, 53-59. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1020>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогодні в світі зростає потреба у переробленні біомаси сільськогосподарських культур, продуктивною частиною яких є зерно (насіння). Такими сільськогосподарськими культурами є пшениця, кукурудза, сояшник, льон олійних тощо. За даними FAOSTAT (FAOSTAT, *n.d.*) обсяги вирощування цих культур за останні роки суттєво зросли, особливо вирощування пшениці та кукурудзи (рис. 1).

Аналіз даних на рис. 1 показує, що обсяги виробництва пшениці, сояшнику, кукурудзи та льону олійного збільшувалися упродовж 2000-2020 років. Одночасно, залишається нерозв'язаною проблема утилізації стеблової біомаси цих культур. Як правило, стеблову біомасу цих культур спалюють на полях, що офіційно заборонено в Україні і є шкідливим для навколишнього середовища, зокрема ґрунту (Гелетуха & Железна, 2014). Ця проблема існує в усьому світі, її розв'язання має глобальне значення для довкілля.

Дослідження щодо перероблення біомаси сільськогосподарських культур висвітлені в наукових працях (Calzolari *et al.*, 2017; Grégoire *et al.*, 2020; Abd-Rabboh *et al.*, 2021; Dey *et al.*, 2022). В Україні використання біомаси стебел сільськогосподарських культур регламентується програмою утилізації відходів (Розпорядження КМУ № 820-р, 2017).

Для ефективного розв'язання проблеми доцільно застосувати комплексний підхід, тобто впровадити технології, які дозволяють використовувати усі складові урожаю: зерно (насіння), лущиння, стебло та його частини,

макуху, кострицю тощо (Ягелюк та ін., 2021). Науковцями доведено (Ягелюк & Дідух, 2020a), що біомаса сільськогосподарських культур має великий потенціал для виробництва широкого асортименту товарів. Встановлено, що найбільш раціональним напрямом перероблення біомаси стебел сільськогосподарських культур є виробництво різних видів твердого палива. Також відомі технології використання біомаси стебел для виробництва будівельних матеріалів та технічного волокна (Фомич, 2022).

Тверде паливо з біомаси стебел – це продукція, яка є вкрай необхідною. Незалежно від типу паливних брикетів, основними технологічними операціями їх виробництва є: збирання (брання) урожаю, різання стеблової біомаси, її подрібнення та сушіння, пресування стеблової біомаси.

**Мета дослідження** – проаналізувати технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів із стебел, визначити найбільш перспективні з них.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Аналітичні дослідження проводилися із використанням методів аналізу, синтезу, наукової абстракції та комплексного підходу. Результати дослідження базуються на матеріалах, що отримані під час аналізу статистичних даних (FAOSTAT, *n.d.*) та інших джерел інформації, щодо обладнання та технології виготовлення паливних матеріалів (Гелетуха & Железна, 2014; C.F. Nielsen A/S, *n.d.*; RUF briquetting systems, *n.d.*; Shuliy Machinery, *n.d.*; Портал bio.ukr.bio, *n.d.*).

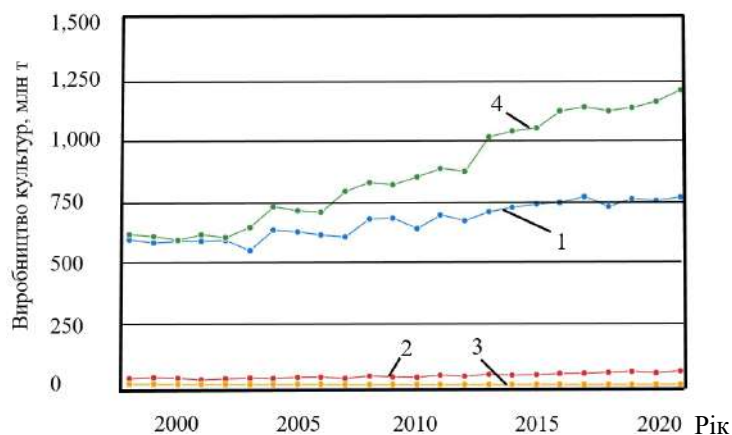


Рис. 1 – Динаміка виробництва сільськогосподарських культур у світі (FAOSTAT, *n.d.*):

1 – пшениця; 2 – сояшник; 3 – льон олійний; 4 – кукурудза



### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Паливні брикети, що виготовлені із біомаси сільськогосподарських культур, – це спресовані рослинні матеріали прямокутної, циліндричної або іншої форми. Типовий діаметр брикетів становить 60–75 мм, а довжина брикетів – не перевищує 5 діаметрів. Стандартних розмірів у паливних брикетів немає (Гелетуха & Желєзна, 2014).

Назва брикетів походить від назви найбільш відомих виробників цієї продукції. Брикети типу RUF – це паливні брикети у формі цеглини, паралелепіпеда чи призми, які

виготовляють за допомогою високого тиску гідравлічними пресами (рис. 2). Розмір брикету залежить від сировини та сили тиску, що прикладається до неї для формування брикету (Гелетуха & Желєзна, 2014; RUF briquetting systems, n.d.).

Технологія виготовлення брикетів RUF містить операції (рис. 3): подрібнена сировина засипається у бункер, звідки за допомогою шнекового конвеєра спрямовується в камеру завантаження; пресування сировини проходить у камері пресування, де пресувальний шток стискає матеріал у прес формі, внаслідок чого брикет набуває необхідної форми та щільності.



Рис. 2 – Типи брикетів (Гелетуха & Желєзна, 2014; RUF briquetting systems, n.d.)

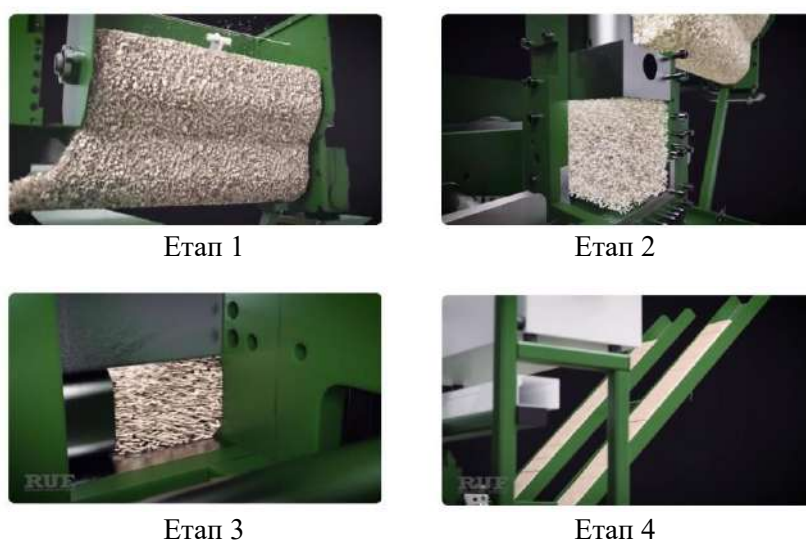


Рис. 3 – Технологія виготовлення брикетів типу RUF (RUF briquetting systems, n.d.)

Брикети типу NESTRO (NIELSEN) – це паливні брикети циліндричної форми або з багатокутним перерізом різної довжини (переважно без внутрішнього отвору), які виготовляються за високого тиску (рис. 2). Брикети NESTRO виготовляють у гідравлічних пресах, а брикети NIELSEN – в ударно-механічних пресах (рис. 4) (Гелетуха & Желєзна, 2014; C.F. Nielsen A/S, n.d.).



Рисю 4 – Прес BP2510 (C.F. Nielsen A/S, n.d.)

Брикети Pini&Kaу – це паливні брикети, що мають циліндричну або багатогранну форму з наскрізним отвором (рис. 2). Наскрізний отвір брикету забезпечує краще горіння внаслідок руху повітря всередині брикету. Ці брикети виготовляються шляхом пресування сухої сировини за високого тиску та температури. Це сприяє оплавленню та

зміцненню поверхні брикетів, що є важливим під час їх транспортування.

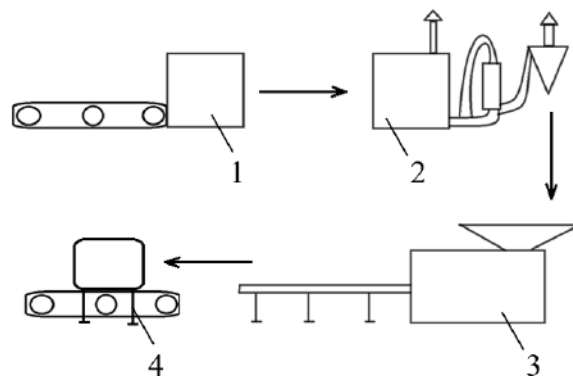
Лінія виготовлення паливних брикетів Pini&Kaу містить технологічне обладнання (Shuliy Machinery, n.d.) (рис. 5):

- барабанний подрібнювач – призначено для подрібнення рослинної сировини перед подальшим обробленням;
- дробарку – призначена для подрібнення сировини на частинки розміром до 8 мм;
- барабанну сушарку – призначена для сушіння подрібненого рослинного матеріалу до вологості, яка нижча 12%;
- машину для брикетування – призначена для виготовлення брикетів за високого тиску та температури;
- пристрій для очищення димових газів – сприяє зменшенню забруднення повітря під час виробництва.

Для реалізації технології виготовлення паливних брикетів типу RUF та NIELSEN з стеблової частини сільськогосподарських культур пропонується комплекс обладнання (рис. 6), що містить: подрібнювач, який подрібнює біомасу до необхідних розмірів; аеродинамічну сушарку, яка, за потреби, сушить до необхідної вологості біомасу; ударно-механічний або гідравлічний прес, який спресовує сировину у брикети заданої форми і щільності; пакувальну машину.



Рис. 5 – Лінія виробництва брикетів типу Pini&Kaу (Shuliy Machinery, n.d.):  
1 – сировина; 2 – брикети



**Рис. 6** – Комплекс обладнання для виготовлення паливних брикетів типу RUF та NIELSEN:  
1 – подрібнювач сировини; 2 – аеродинамічна сушарка сировини; 3 – прес сировини;  
4 – машина для пакування брикетів

Перспективною рослинною сировиною для виробництва паливних матеріалів є стеблова складова урожаю льону олійного. Льон олійний – це складна для виробництва і перероблення культура, оскільки потрібні спеціальні технології та обладнання. Огляд сучасних технологій перероблення луб'яних культур подано в науковій праці (Ягелюк та ін., 2022). Із стеблової складової урожаю льону олійного, окрім виготовлення паливних брикетів, перспективним є виробництво малогабаритних паливних рулонів (МПР). Технологічні операції для їх виробництва можуть виконуватися технічними засобами, що обладнані пристосуванням для руйнування стебел (зменшення їх пружних властивостей) та формування МПР (Ягелюк & Дідух, 2020b). Використання МПР дозволить розв'язати актуальну задачу утилізації залишків стебел сільськогосподарських культур, зокрема льону олійного, та забезпечити населення дешевим паливом (Yaheliuk et al., 2020; Ягелюк та ін., 2022).

### ВИСНОВКИ

Внаслідок збільшення площ посіву сільськогосподарських культур у великій кількості продукується біомаса, яку необхідно утилізувати. Біомаса стебел може стати перспективним джерелом екологічно чистої енергії в Україні та світі, якщо її переробляти у тверде паливо, зокрема, паливні брикети. Широкий вибір технологій виготовлення брикетів різних типів дозволяє підібрати найбільш придатну з них для певного виду рослинної сировини.

Аналіз технологій та обладнання для виготовлення паливних брикетів із стебел дозволив зробити висновки:

- перевагою паливних брикетів типу RUF є низька собівартість виготовлення; недоліками брикетів є низька щільність ( $750\text{--}800\text{ кг/м}^3$ ), мала стійкість до вологи та механічних пошкоджень, що негативно впливає на їх транспортування;

- перевагами паливних брикетів NIELSEN є низька собівартість виготовлення і достатньо висока щільність ( $1000\text{--}1150\text{ кг/м}^3$ ); недоліком цих брикетів є низька вологостійкість;

- перевагами паливних брикетів Pini&Kau є стійкість до механічних пошкоджень, висока вологостійкість та щільність ( $1100\text{--}1400\text{ кг/м}^3$ ); недоліками цих брикетів є висока собівартість виготовлення та необхідність подрібнення сировини.

Перспективним для брикетування стебел сільськогосподарських культур є технологія та технологічне обладнання для виробництва брикетів типу RUF або NIELSEN, що забезпечують низьку собівартість продукції. Комплекси із виготовлення брикетів цих типів можна розташовувати в агропідприємствах, що дозволить переробляти стеблову масу в паливні брикети безпосередньо на місці.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Abd-Rabboh, A. M. K., Mazrou, Y., El-Borhamy, A. M. A., Abdelmasie, H. W. K. L., Hafez, Y., & Abdelaal, K. A. (2021). Effect of sowing dates and seed rates of flax intercropped with sugar beet on productivity of both crops and competitive relationships. *Rom Biotechnol Lett*, 26(6), 3074-3089. <https://doi.org/10.25083/rbl/26.6/3074-3089>

- Calzolari, D., Magagnini, G., Lucini, L., Grassi, G., Appendino, G. B., & Amaducci, S. (2017). High added-value compounds from Cannabis threshing residues. *Industrial Crops and Products*, 108, 558-563.
- C.F. Nielsen A/S. (n.d.). *Turn waste into value*. Retrieved March 28, 2023, from <https://cfnielsen.com>
- Dey, P., Mahapatra, B. S., Pramanick, B., Pyne, S., & Pandit, P. (2022). Optimization of seed rate and nutrient management levels can reduce lodging damage and improve yield, quality and energetics of subtropical flax. *Biomass and Bioenergy*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106355>
- FAOSTAT. (n.d.). *Виробництво сільськогосподарських культур для отримання зерна (насіння) (Production of agricultural crops for obtaining grain (seeds))*. Retrieved March 26, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Grégoire, M., Barthod-Malat, B., Labonne, L., Evon, P., Luycker, E., & De Ouagne, P. (2020). Investigation of the potential of hemp fibre straws harvested using a combine machine for the production of technical load-bearing textiles. *Industrial Crops and Products*, 145, 111988. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111988>
- RUF briquetting systems. (n.d.). *Our proven briquetting systems change how you process and dispose of your byproducts*. Retrieved March 28, 2023, from <https://www.ruf-briquetter.com>
- Shuliy Machinery. (n.d.). *8–10 t/d Biomass Charcoal Project*. Retrieved March 28, 2023, from <https://charcoalmachines.com>
- Yaheliuk, S., Didukh, V., Busnyuk, V., Boyko, G., & Shubalyi, O. (2020). Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3), 361-368.
- Гелетука, Г. Г., & Железна, Т. А. (2014). Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні (*Prospects for using agricultural waste for energy production in Ukraine*). Аналітична записка БАУ, 7, 12-16.
- Портал bio.ukr.bio. (n.d.). *Паливні брикети – сировина і стандарти (Fuel briquettes – raw materials and standards)*. Retrieved March 28, 2023, from <https://bio.ukr.bio/ua/articles/1589/>
- Розпорядження КМУ № 820-р. (2017). *Національна стратегія управління відходами (National Waste Management Strategy)*. Retrieved March 26, 2023, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
- Фомич, М. І. (2022). Можливість виготовлення будівельних матеріалів з відходів сільськогосподарських рослин (*The possibility of manufacturing building materials from agricultural plant waste*). *Молодіжна наука заради миру та розвитку*, 595-597.
- Ягелюк, С., & Дідух, В. (2020a). Напрямки використання продукції переробки льону олійного та льону-довгунця (*The use of produce of the flax processing*). *Товарознавчий вісник*, 1(13), 292-305. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25>
- Ягелюк, С. В., & Дідух, В. Ф. (2020b). Концептуальна модель технологій переробки стебел льону (*A concept model of technologies for processing flax stems*). *Сільськогосподарські машини*, 44, 155-164. <https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.300>
- Ягелюк, С. В., Фомич, М. І., Голій, О. В., & Хомич, А. В. (2021). Ідентифікація та класифікація залишків сільськогосподарських культур для подальшого використання (*The identification and classification of the agricultural crops residues for further use*). *Сільськогосподарські машини*, 47, 95-101. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.654>
- Ягелюк, С. В., Фомич, М. І., & Ягелюк, О. О. (2022). Сучасні технології переробки біомаси луб'яних культур (*The modern technologies of bast crops biomass processing*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 59-66. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.841>

## MODELING THE TEMPERATURE FIELD IN THE SOIL MASSIF

O. Zolotovska\*, H. Tesliuk, V. Boiko

Dnipro State Agrarian and Economics University, Dnipro, Ukraine

---



### ABSTRACT

*The ever-increasing cost of energy resources, especially fossil fuels, makes it necessary to find new ways of generating energy. In the field of energy and energy saving, new methods of energy production are being researched and developed. In particular, traditional production methods are being improved, resource-saving processes are being developed, equipment efficiency is being increased and renewable energy sources are being used. One effective method of saving fuel and protecting the environment is the widespread use of heat pumps. Heat pumps can play an important role in the use of renewable energy sources, especially in agriculture. The article presents the results of the study of the temperature field in the soil massif around the soil heat exchanger using a heat pump. An increase in heat productivity is ensured by reducing the temperature difference of the heat carrier in the soil heat exchanger and in the evaporator. Therefore, an additional heat source selected from the heat supply system is proposed. The reduction of the temperature range between the evaporator and the coolant from the soil heat exchanger is also influenced by: the temperature of the soil layers; the heat flow in the soil; the distance between the boreholes at which the energy potential of the soil mass is maintained. The process of adding (removing) heat from a low potential energy source is a function of time and space. The temperature field is formed from the geometric center – the axis of the borehole. A well and a low-potential heat source is a complex calculation object and is characterized by variable boundary conditions. Therefore, the solution of this problem is performed using an implicit difference scheme and a volume control method with a shifted grid. The article calculates the temperature field of multi-layered soil massifs with different coolant temperatures, taking into account the thermos-physical parameters of the soil around the borehole. This technique can also be used to predict the thermal regime of the soil, which makes it possible to control the accumulation of heat around the soil heat exchanger.*

#### **Key words:**

soil,  
heat source,  
pump,  
soil heat exchanger,  
heat output

#### **Article history:**

Received 10.05.2023

Accepted 09.06.2023

#### **\*Corresponding author:**

zolotovska.o.v@dsau.dp.ua

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1021

#### **To cite this article:**

Zolotovska, O., Tesliuk, H., & Boiko, V. (2023). Modeling the temperature field in the soil massif. *Agricultural Machines*, 49, 60-67. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1021>

УДК 662.9

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ

О.В. Золотовська\*, Г.В. Теслюк, В.Б. Бойко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна



## АНОТАЦІЯ

Постійне зростання вартості енергоресурсів, зокрема викопного палива, спричиняє необхідність пошуку нових способів виробництва енергії. Ефективний метод економії палива та захисту навколишнього середовища полягає в широкому використанні теплонасосних установок. Теплові насоси можуть відіграти вирішальну роль у використанні відновлювальних джерел енергії, зокрема в сільському господарстві. В статті подані результати дослідження температурного поля в ґрунтовому масиві навколо ґрунтового теплообмінника з використанням теплового насоса. Підвищення теплопродуктивності забезпечується внаслідок зменшення різниці температур теплоносія в ґрунтовому теплообміннику та у випарнику. Тому запропоноване додаткове джерело тепла, яке відбирається з системи теплопостачання. Також на зменшення діапазону температур між випарником та теплоносієм з ґрунтового теплообмінника впливають: температура шарів ґрунту; тепловий потік ґрунту; відстань між свердловинами, за якої зберігатиметься енергетичний потенціал масиву ґрунту. Процес підведення (відведення) тепла в низькопотенційне джерело енергії є функцією часу та простору. Температурне поле формується від геометричного центру – осі свердловини. Свердловина та низькопотенційне джерело теплоти є складним комплексним об'єктом розрахунку та характеризується змінними граничними умовами. Тому розв'язування цієї задачі виконується з використанням неявної різницевої схеми та методу контролю об'єму зі зміщеною сіткою. У статті подані результати обчислення температурного поля багатошарових ґрунтових масивів з різними температурами теплоносія, під час яких враховані теплофізичні параметри ґрунту навколо свердловини. Ця методика також може бути використана для прогнозування термічного режиму ґрунту, що дозволяє контролювати накопичення теплоти навколо ґрунтового теплообмінника.

**Ключові слова:**

ґрунт,  
джерело тепла,  
тепловий насос,  
ґрунтовий теплообмінник,  
теплопродуктивність

**Історія публікації:**

Отримано 10.05.2023

Затверджено 09.06.2023

**\*Автор для листування:**

zolotovska.o.v@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1021

**Цитувати цю статтю:**

Золотовська, О. В., Теслюк, Г. В., & Бойко, В. Б. (2023). Моделювання температурного поля в ґрунтовому масиві. *Сільськогосподарські машини*, 49, 60-67. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1021>



## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зростання вартості енергетичних ресурсів, зокрема викопного палива, спричиняє пошук нових способів виробництва енергії. У галузі енергетики та енергозбереження проводиться розроблення нових методів виробництва енергії, удосконалюються традиційні методи виробництва, розробляються енергозберігаючі процеси, підвищується ефективність роботи обладнання, використовуються відновлювальні джерела енергії. Розв'язати важливу проблему здешевлення енергоресурсів можна шляхом використання енергії сонця, вітрової енергії, геотермальної та інших видів енергії. Це дозволить зекономити матеріальні ресурси та мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

Ефективний метод економії палива та захисту навколишнього середовища полягає у використанні теплонасосних установок, які дозволяють з мінімальними витратами комплексно розв'язувати нагальні проблеми енергозбереження. У перспективі теплові насоси (ТН) можуть відіграти вирішальну роль у використанні відновлювальних джерел енергії, зокрема в сільському господарстві. Теплонасосна установка (ТНУ) ефективно трансформує електроенергію в теплову енергію. Використання ТНУ може забезпечити значну економію палива порівняно з використанням палива в котельнях.

Особливий інтерес поміж споживачів викликає використання низькопотенційної теплоти ґрунту. Перевагою цього джерела є повсюдна доступність та відносно постійна температура. Системи теплопостачання з використанням теплоти ґрунту, зокрема на основі парокомпресійних теплових насосів, набувають широкого поширення в країнах, для яких актуальними є проблема збереження енергії і енергетична безпека. Їх застосування дозволяє частково відмовитися від дорогого імпортованого викопного палива, замінивши його споживання відновлюваною і екологічно чистою теплою ґрунту. Проте, в Україні напрям використання теплоти ґрунту не знайшов широкого розвитку.

Способи підвищення ефективності ТНУ висвітлені в наукових працях (Голуб & Кепко, 2002; Нікулішин & Височин, 2014; Босий & Кузик, 2020), де проведено обчислення параметрів ТНУ. Необхідно зауважити, що в

цих наукових працях розглянуто розрахунки статичних характеристик ТН, незалежно від характеристик споживача і джерела вторинної енергії. У наукових джерелах виконано аналіз перспектив використання геотермальної енергії ТНУ та досліджено ефективність роботи гідротермальної теплонасосної системи шляхом обґрунтування термодинамічних та техніко-економічних характеристик ТНУ (Ткачук, 2015; Зур'ян & Олійніченко, 2021).

Проведені теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження ефективності теплонасосних систем дозволяють встановити зв'язок між параметрами первинного джерела низькопотенційного тепла та конструктивними особливостями системи теплопостачання. У науковій праці (Горобець & Яценко, 2014) подано результати дослідження процесів аеродинаміки та температурного поля в системах опалення, що дозволяють визначити максимальні та мінімальні швидкості руху повітря та його температуру.

Відомо досить мало інформації щодо накопичення теплоти в ґрунті для використання ґрунтових теплообмінників в системі теплового насосу. Тепловий режим ґрунту поверхневих шарів планети формується під дією двох основних факторів: сонячної радіації та потоку радіогенного тепла із надр планети. Сезонні та добові зміни інтенсивності сонячної радіації та температури зовнішнього повітря спричиняють коливання температури верхніх шарів ґрунту. Глибина впливу добових коливань температури зовнішнього повітря та сонячної радіації, залежно від конкретних ґрунтово-кліматичних умов, коливається в межах від декількох десятків сантиметрів до 1,5 м. Глибина впливу сезонних коливань температури зовнішнього повітря та сонячної радіації не перевищує, як правило, 15–20 м.

**Мета дослідження** – обґрунтування підвищення ефективності використання ТНУ з ґрунтовими теплообмінниками для потреб теплозабезпечення в сільському господарстві (наприклад, опалення ферм, адміністративних та житлових приміщень, теплиць, сушіння сільськогосподарських культур тощо).

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Теоретичні дослідження базуються на методах теплофізики, математичної фізики та тепломасообміну, які охоплюють основи

теплопровідності в нестационарному режимі. Ці дослідження є складним комплексним об'єктом розрахунку, що характеризується змінними граничними умовами.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На сьогодні актуальним завданням є пошук альтернативи викопному паливу. Науковцями досліджується можливість заміни газових котлів теплонасосними установками.

Теплове навантаження залежить як від температури навколишнього середовища, так і від теплоти ґрунту. ТН в холодну пору року працюють на максимальному навантаженні. Водночас, збільшується перепад температури між теплоносієм та джерелом тепла, що спричиняє збільшення затрат енергії в ТН. Очевидно, що систему теплопостачання котельні з'єднують для догріву теплоносія з тепловими насосами. Тому пропонується дослідження ТН з використанням додаткового тепла із тепломережі, що дозволить підтримати температуру теплоносія. Якщо розглядати варіанти схем теплопостачання, то постає питання вибору конструкції ТН та джерела теплоти з необхідним діапазоном температур. Схема цієї системи містить три взаємопов'язані контури: 1 – первинний контур (система ґрунтових теплообмінників); 2 – ТН; 3 – споживач. На ефективність цієї системи впливають параметри джерела тепла (температура й теплофізичні властивості ґрунту) і ґрунтових теплообмінників (розміри, властивості матеріалів, режим течії теплоносія), які до того ж є однією з найбільш витратних складових усієї системи (Ткаченко & Остапенко, 2009). Ця особливість вимагає розроблення підходу, що дозволить оцінити ґрунтові теплообмінники. ТН є сполучною ланкою між джерелом та споживачем тепла і призначений для підвищення потенціалу теплоти ґрунту. Для точного аналізу системи потрібен достовірний аналіз контуру ТН. Споживачем тепла можуть бути: технологічні комплекси, системи гарячого водопостачання та опалення.

Функціонування контуру ТН є складним процесом спільної роботи теплообмінної апаратури контуру (випарника, конденсатора, теплообмінних апаратів), компресорного обладнання і терморегулюючого вентиля.

Для детального аналізу роботи контуру ТН необхідно враховувати параметри в характерних точках циклу, характеристики компресора, процеси нагрівання, охолодження і фазових переходів у теплообмінних апаратах контуру. У випарнику ТН холодоагент у джерела теплоти з температурою до 10°C забирає необхідне для випаровування тепло. У компресорі пар холодоагенту стискається до 30 бар та надходить в конденсатор. При цьому досягається температура до 75°C і віддається тепло теплоносію споживача. Із тепломережі, як додаткове джерело теплоти, відбирається частина теплової енергії та подається в пластинчатий теплообмінник, який працює за принципом «протитоку» із раціональним використанням енергії. Після цього холодоагент надходить у випарник та цикл роботи повторюється.

Для підвищення теплопродуктивності ТН необхідно зменшити різницю температур теплоносія в ґрунтовому теплообміннику та у випарнику. Пропонується додаткове джерело тепла (рис. 1), яке відбирається з системи теплопостачання (опалення та ГВС) та подається в пластинчатий теплообмінник.

У результаті аналізу з'ясували, що використання ТН з додатковим відбиранням теплоти від тепломережі є доцільним. Внаслідок збільшення температури фреону у випарнику до 13°C витрачається менше енергії на стиск парів фреону в компресорі, де на виході з нього температура теплоносія зростає з 30–35°C до 45–55°C, та до споживача теплоносії надходить з температурою 75°C. Також при відбиранні теплоти з тепломережі зростає теплопродуктивність до 323 кДж/кг, що дозволяє отримати на 1,8 кВт більше тепла та зекономити електроенергії до 7 кВт·год. На результат зменшення діапазону температур між випарником та теплоносієм з ґрунтового теплообмінника також може вплинути: температура шарів ґрунту; тепловий потік ґрунту; відстань між свердловинами, яка зберігатиме енергетичний потенціал ґрунту.

Температурний режим шарів ґрунту, що розташовані нижче 15–20 м, формується під дією теплової енергії з надр планети і не залежить від сезонних та добових коливань. Сонячна радіація становить 1,4 кВт/м<sup>2</sup> за добу, вона формує запаси тепла, безпосередньо, на поверхні ґрунту.

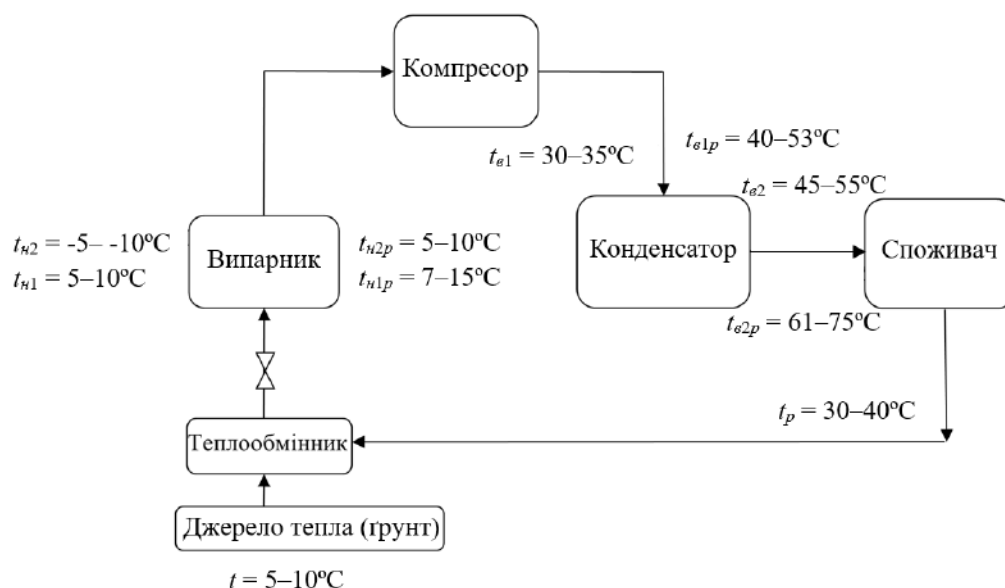


Рис. 1 – Розрахункова модель схеми ТН з ґрунтовим теплообмінником

Кількісною характеристикою запасів тепла є залежність розподілу температури ґрунтів від глибини та пори року. Динаміка зміни температури ґрунту на різних глибинах, а також максимальне і мінімальне значення температур на поверхні дозволяють визначити запаси теплової енергії. Процес підведення (чи відведення) тепла в низькопотенційне джерело енергії є функцією часу та простору.

Температурне поле формується від осі свердловини, що є геометричним центром. Розрахункова модель в ґрунті приймається як циліндричне тіло, яке складається з кількох контурів (рис. 2):

- зовнішня межа контуру – це контур впливу теплового потоку;

- внутрішня межа контуру – це трубка теплообмінника в свердловині, через стінку якого проходить теплообмін між циркулюючим теплоносієм та низькопотенційним джерелом енергії.

Відстань між свердловинами повинна бути такою, щоб їхні температурні поля не перетиналися та в період експлуатації навколишній ґрунтовий масив не піддавався заморожуванню. Розв’язання цієї задачі дозволить встановити необхідні межі поверхні ґрунту під поле свердловин та зробити оптимальне розмежування території. Знаючи скільки енергії ґрунтовий теплообмінник забирає з масиву ґрунту, а також властивості теплоносія та його температуру на вході в

ґрунтовий теплообмінник, властивості масиву ґрунту, матеріалу труб теплообмінника та наповнювача свердловини, можна обчислити об’єм ґрунту, що потрібен для покриття необхідного навантаження на систему тепlopостачання. Для цього пропонується масив ґрунту, що оточує свердловину, у формі циліндра.

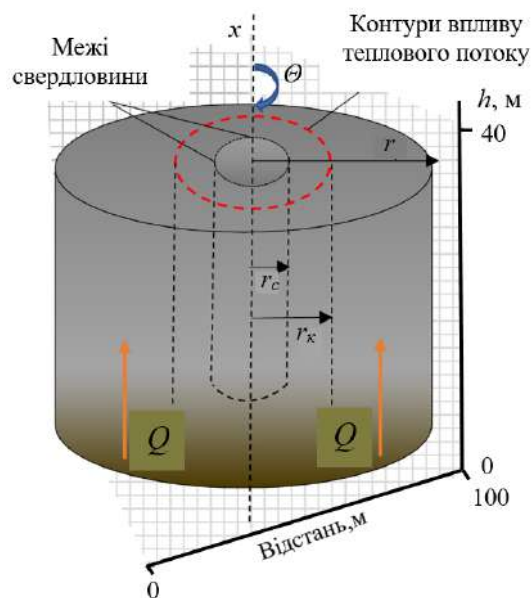


Рис. 2 – Модель поширення тепла навколо ґрунтового теплообмінника

Кількість теплоти, яка відбирається від однієї свердловини:

$$Q = 86400q_{cv} \cdot L_{cv} \cdot n, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, яка відбирається від однієї свердловини, Дж;  $q_{cv}$  – середній тепловий потік з 1 м свердловини, Вт/м;  $L_{cv}$  – глибина свердловини, м;  $n$  – тривалість опалювального періоду.

Контур ґрунтового масиву теплового потоку навколо свердловини:

$$V_{zp} = \frac{Q}{c_{zp} \cdot \rho_{zp} \cdot \left[ t_{zp} - \left( \frac{t_{ex} + t_{vix}}{2} \right) \right]}, \quad (2)$$

де  $V_{zp}$  – контур ґрунтового масиву теплового потоку, м<sup>3</sup>;  $c_{zp}$  – питома теплоємність ґрунтового масиву, Дж/(кг·К);  $\rho_{zp}$  – щільність ґрунтового масиву, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{zp}$  – температура ґрунтового масиву, °С;  $t_{ex}$ ,  $t_{vix}$  – температура входу та виходу робочої рідини в ґрунтовому теплообміннику, °С.

Відстань від центра свердловини з ґрунтовим теплообмінником до межі контуру ґрунтового масиву:

$$r_k = \sqrt{\frac{V_{zp}}{\pi \cdot L_{cv}}}, \quad (3)$$

де  $r_k$  – радіус контуру свердловини, тобто розповсюдження теплоти, м.

Відстані між свердловинами:

$$R_{cv} = 2 \sqrt{\frac{86400q_{cv} \cdot n}{\pi c_{zp} \cdot \rho_{zp} \cdot \left[ t_{zp} - \left( \frac{t_{ex} + t_{vix}}{2} \right) \right]}}, \quad (4)$$

де  $R_{cv}$  – відстань між свердловинами, м.

Для проведення обчислень прийнято початкові дані: температура теплоносія з ТН – 0°С; температура в зворотній трубці – 5°С; температура на глибині 10 м – 15°С.

Зовнішня межа контуру  $r_k$  в обчисленнях приймається як умовна межа, на якій температура під час роботи свердловини змінюється в межах похибки вимірювань. Для теплового контуру одиночної свердловини виконуємо обчислення у межах  $r_k = 20\text{--}25$  м. Температуру ґрунтового масиву знаходимо в зоні впливу свердловини.

Оскільки свердловина і низькопотенційне джерело теплоти є складним комплексним об'єктом розрахунку та характеризується змінними граничними умовами, відповідно, розв'язування цієї задачі виконується із використанням неявної різницевої схеми та методу контролю об'єму зі зміщеною сіткою. Товщина контрольованого об'єму в напрямку осі  $z$  приймається за 1. Ділянка зі штриховими лініями (рис. 3) – це розрахункова область елементарної комірки.

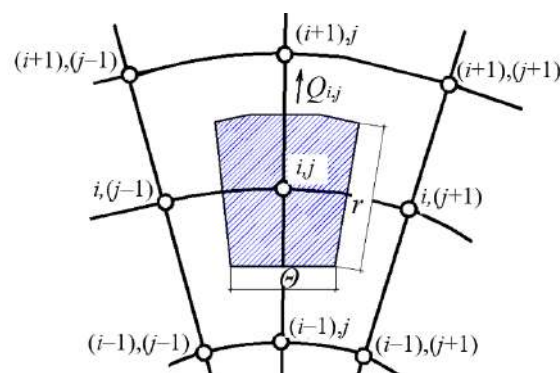


Рис. 3 – Розрахункова сітка ґрунтового масиву в полярних координатах  $r$ ,  $\theta$  ( $\theta$  – кут між радіусом-вектором та віссю  $x$ ;  $r$  – радіальна координата;  $Q_{ij}$  – тепловий потік)

Тепловий потік через поверхню масиву обчислюється з використанням температур  $t_{i,j}$ ,  $t_{i,(j+1)}$ ,  $t_{(i+1),j}$ ,  $t_{i,(j-1)}$ ,  $t_{(i-1),j}$  у вузлах сітки (рис. 3), що зміщені відносно ґрунтового масиву навколо ґрунтового теплообмінника, що, в свою чергу, дозволяє підвищити стійкість розв'язку. Тобто тепловий потік обчислюється посередині відрізка, який з'єднує вузли, через які знаходиться градієнт.

Для розв'язання задачі використовуємо спрощене рівняння за умови, що  $r_c < r < r_k$ :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (5)$$

де  $r_c$  – радіус ґрунтового теплообмінника, м.

Спрощення задачі відбувається шляхом переходу від тримірної до двомірної моделі, що виключає тепловий потік вздовж осі свердловини. Водночас, тепловий потік у вертикальному напрямку має бути враховано, оскільки він неперервний в часі, навіть у випадку зупинки ТН.

Для розв'язання цієї задачі вводиться компенсуюча поправка – об'ємні джерела та додаткове тепло з тепломережі:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{c}, \quad (6)$$

де  $t$  – температура ґрунту, °С;  $\tau$  – час, с;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності, м<sup>2</sup>/с;  $r$  – радіальна координата, м;  $q_v$  – джерела тепла, обумовлені тепловими потоками з глибини та із тепломережі, Вт/м<sup>2</sup>;  $c$  – теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Рівняння (6) в дискретному вигляді матиме вигляд:

$$\frac{a_{i,j} t_{i,j}}{\Delta \tau} = \frac{a_{i,j}^0 \Delta \tau}{\Delta r^2} [t_{(i-1),j(\tau)} - 2t_{i,j(\tau)} + t_{(i+1),j(\tau)}] +$$

$$+ \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} [t_{i,(j-1)(\tau)} + t_{i,(j+1)(\tau)}] + \frac{1}{r} [t_{i,(j-1)(\tau)} - 2t_{i,j(\tau)} + t_{i,(j+1)(\tau)}] + q_{i,j} \frac{\Delta \tau}{c}. \quad (7)$$

З отриманого рівняння (7) визначається температурне поле, зокрема температура ґрунтового масиву навколо свердловини. На **рис. 4** та **рис. 5** подано результати досліджень температурного поля ґрунтового масиву навколо свердловини. Аналіз даних показує, що теплота в ґрунті акумулюється: в радіусі 15–25 мм та зберігається близько 3,5 год (за температура теплоносія 20–40°С); в радіусі 15–35 мм та зберігається протягом 3,4–4,2 год (за температура теплоносія 60–80°С). Зі збільшенням радіуса  $r$  тривалість зберігання теплового потоку і температури зменшується.

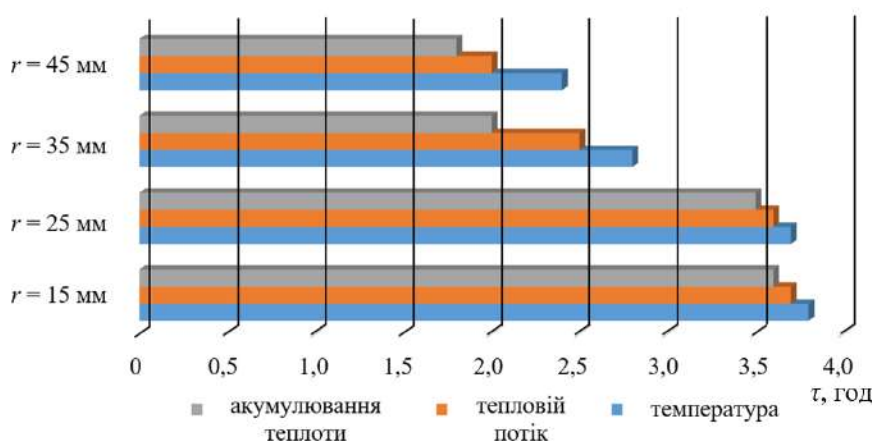


Рис. 4 – Результати досліджень температурного поля в ґрунті з температурою теплоносія 20–40°С

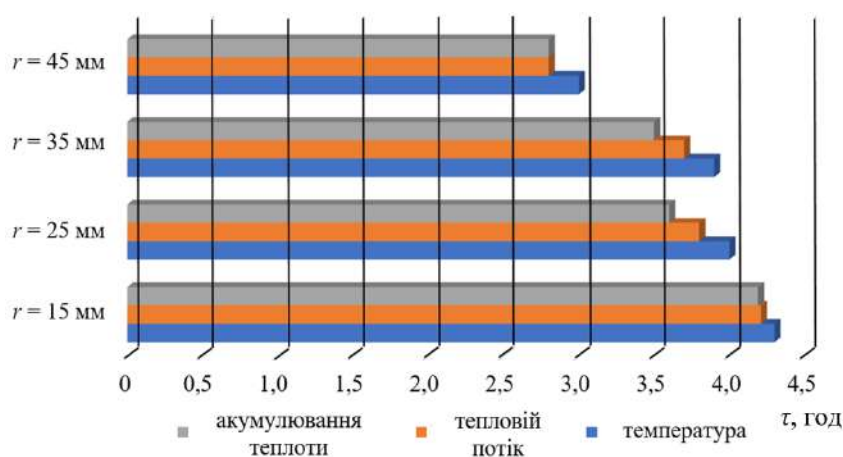


Рис. 5 – Результати досліджень температурного поля в ґрунті з температурою теплоносія 60–80°С

**ВИСНОВКИ**

Отримана математична модель дозволяє виконувати обчислення температурного поля багатошарових ґрунтових масивів із різними температурами теплоносія, урахуваючи теплофізичні параметри ґрунту навколо свердловини. Необхідно зазначити, що запропонована методика може бути основою не лише для аналізу, але й для прогнозу термічного режиму ґрунту.

**СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

- Босий, М. В., & Кузик, О. В. (2020). Ефективність циклу теплового насоса для тепlopостачання (*Heat pump cycle efficiency for heat supply*). *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 3(34), 136–142. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).136-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).136-142)
- Голуб, Г. А., & Кепко, О. І. (2002). Математична модель теплонасосної системи тепlopостачання споруд закритого ґрунту (*Mathematical model of heat pump system of heat supply of closed ground structures*). *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*, 10, 275-278.
- Горобець, В. Г., & Яценко, О. В. (2014). Розробка системи опалення та математичної моделі процесів тепло- і масопереносу в теплицях з використанням альтернативних джерел енергії (*Development of a heating system and a mathematical model of heat and mass transfer processes in greenhouses using alternative energy sources*). *Енергетика і автоматика*, 1, 25-37.
- Зур'ян, О. В., & Олійніченко, В. Г. (2021). Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність (*Hydrothermal system of thermal energy, physical processes, efficiency*). *Вісник Вінницького політехнічного інституту. Енергетика, електротехніка та електромеханіка*, 4, 40-46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>
- Нікулішин, В. О., & Височин, В. В. (2014). *Теплові насоси та кондиціонери (Heat pumps and air conditioners)*. Одеса: Медіа-Арт.
- Ткаченко, С. Й., & Остапенко, О. П. (2009). *Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання (Steam compression heat pump installations in heat supply systems)*. Вінниця: ВНТУ.
- Ткачук, К. К. (2015). Перспективи застосування теплових насосів в Україні (*The prospect of heat pumps using in Ukraine*). *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, 27, 144-153.



## MODELING OF OIL CROP SEED DRYING

T. Haponiuk, R. Kirchuk\*, L. Zabrodotska

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



## ABSTRACT

The agricultural sector of the economy increases the production of oil crops. Demand for vegetable oils is growing worldwide. Prices of oil crops are comparatively higher than for grain crops. Despite the increase in production costs, the profitability of the cultivation of oil crops determines the growth trend in their production and processing volumes. The processing industry is one of the main and largest users of oilseeds. In Ukraine, the main oil crops are sunflower, soybean and rapeseed, and linseed. In Ukraine, including the region of Western Polissya, more and more attention is paid to the cultivation of linseed. The main value of linseed is in the seed, so it is important to obtain high quality seeds when growing this crop. Weather conditions can cause increased crop moisture. Excessive seed moisture content during storage has a very negative effect on seed quality, leading to deterioration and, as a result, significant losses at the stage of post-harvest processing and storage, which leads to the need for artificial drying. The purpose of the study is to substantiate the most rational drying regimes of linseed by modeling drying process, ensuring high productivity and quality of the seeds, avoiding undesirable excessive energy costs. Experimental studies were carried out using the developed experimental equipment. For the study, linseed of the variety «Southern Night», which was obtained by harvesting in a single-phase method, was used. Then, linseed was cleaned. The initial moisture content of linseed was 14.3%. Linseed drying was carried out at drying agent temperatures of 35, 45, 55 and 65°C. The air flow rate in the drying chamber was 1.9–2.0 m/s and the thickness of the linseed layer was 2 cm. A drying process models of bulk materials are summarized in the article. The coefficients of the drying process models were obtained as a result of a non-linear regression analysis carried out using SPSS 17.0 software. The accuracy of drying process models and their comparison was assessed. The obtained mathematical model of the linseed drying process takes into account the following parameters: type of drying, interaction of the seed with the drying agent, moisture content of the seed layer.

**Key words:**

drying model,  
drying kinetics,  
oil crops,  
linseed,  
energy saving

**Article history:**

Received 10.05.2023

Accepted 10.06.2023

**\*Corresponding author:**

ruslan-mail@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1022

**To cite this article:**

Haponiuk, T., Kirchuk, R., & Zabrodotska, L. (2023). Modeling of oil crop seed drying. *Agricultural Machines*, 49, 68-74. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1022>

УДК 631.365.22

## МОДЕЛЮВАННЯ СУШІННЯ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Т.О. Гапонюк, Р.В. Кірчук\*, Л.Ю. Забродоцька

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна



## АНОТАЦІЯ

Аграрний сектор економіки збільшує виробництво олійних культур. Попит на рослинні олії зростає у всьому світі. Ціни на олійні культури вищі, ніж на зернові. Попри зростання собівартості агропродукції, рентабельність вирощування олійних культур визначає тенденцію зростання обсягів їх виробництва та перероблення. Переробна промисловість є одним із основних і найбільших споживачів олійних культур. В Україні основними олійними культурами є соняшник, соя, ріпак, льон. В Україні, зокрема у Західному Поліссі, все більше уваги приділяється вирощуванню льону олійного. Основна цінність льону олійного полягає в насінні, тому під час вирощування цієї культури важливо отримати насіння високої якості. Погодні умови можуть спричинити підвищену вологість насіння. Надмірна вологість насіння під час зберігання дуже негативно впливає на якість насіння, спричиняє його псування і, як наслідок, значні втрати на етапі післязбирального оброблення та зберігання, що спричиняє необхідності штучного сушіння насіння. Мета дослідження – шляхом моделювання процесу сушіння обґрунтувати найбільш раціональні режими сушіння насіння льону, що забезпечують високу продуктивність та якість насіння, уникаючи небажаних надлишкових витрат енергії. Експериментальні дослідження проводили на розробленій установці. Для дослідження використовували льон олійний сорту «Південна ніч», що отриманий шляхом збирання прямим комбайнуванням. Початкова вологість насіння льону становила 14,3%. Сушіння насіння льону проводили за температури сушильного агента 35, 45, 55 та 65°C. Швидкість потоку повітря в сушильній камері становила 1,9–2,0 м/с, товщина шару льону – 2 см. У статті узагальнено моделі процесу сушіння сипких матеріалів. Коефіцієнти моделей процесу сушіння були отримані за результатами нелінійного регресійного аналізу, що проведено за допомогою програмного забезпечення SPSS 17.0. Оцінено точність моделей процесу сушіння.

**Ключові слова:**

модель сушіння,  
кінетика сушіння,  
олійні культури,  
льон олійний,  
енергозбереження

**Історія публікації:**

Отримано 10.05.2023

Затверджено 10.06.2023

**\*Автор для листування:**

ruslan-mail@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1022

**Цитувати цю статтю:**

Гапонюк, Т. О., Кірчук, Р. В., & Забродоцька, Л. Ю. (2023). Моделювання сушіння насіння олійних культур. *Сільськогосподарські машини*, 49, 68-74. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1022>

## INTRODUCTION AND PROBLEM STATEMENT

In Ukraine, the agricultural sector of the economy increases the production of oil crops. Demand for vegetable oils is growing worldwide. Prices of oil crops are comparatively higher than for grain crops. Despite the increase in production costs, the profitability of the cultivation of oil crops determines the growth trend in their production and processing volumes.

The processing industry is one of the main and largest users of oil crop seeds. Their products – vegetable oils, meal, and cakes – provide a fairly significant share of foreign exchange earnings from agricultural exports. Between 2010 and 2018, the production of vegetable oil processing companies almost doubled. About 6.2 million tons of vegetable oil were produced, and vegetable oil export was 6 million tons. Therefore, determining the effectiveness of Ukraine's export of oil crop seeds and their processed products in the conditions of modern integration processes is an urgent problem.

In Ukraine, the main oil crops are sunflower, soybean and rapeseed, and linseed. In Ukraine, including the region of Western Polissya, more and more attention is paid to the cultivation of linseed. Linseed is an agricultural crop of great economic importance. In different branches of economy, it is possible to use stems, straw, seeds, linseed cake. However, the main purpose of cultivation of linseed is to obtain oil, which, depending on the linseed variety, can contain about 50% in flax seeds (Didukh, 2002). The main value of linseed is in the seed, so it is important to obtain high quality seeds.

Weather conditions can cause increased crop moisture. Excessive seed moisture content during

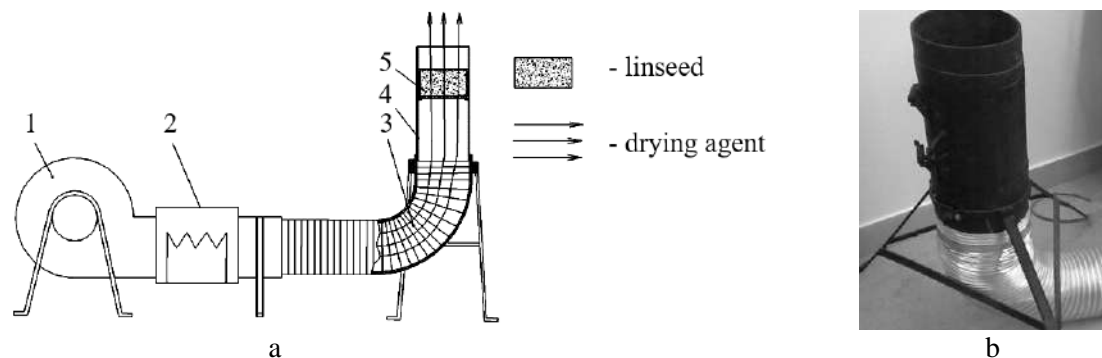
storage has a very negative effect on seed quality, leading to deterioration and, as a result, significant losses at the stage of post-harvest processing and storage, which leads to the need for artificial drying. The study of the drying process of various plant materials, especially a dense layer of bulk seed material, has been carried out by a number of scientists (Mujumdar, 2006; Yaschuk & Kirchuk, 2011; Didukh et al., 2013; Yaschuk et al., 2013).

Research on harvesting and post-harvest processing of flax is mainly related to the study of the properties of flax components, seed cleaning problems, as well as drying of flax and flax straw, and is mainly devoted to fibre flax (Didukh et al., 2008; Dudarev & Kirchuk, 2011). Insufficient attention has been paid to the study of harvesting and post-harvest processing of linseed.

**The Goal of the Study** is to substantiate the most rational drying regimes of linseed by modeling seed drying process, ensuring high productivity and quality of the seeds, avoiding undesirable excessive energy costs.

## MATERIALS AND METHODS

Experimental studies were carried out using the developed experimental equipment (Fig. 1). For the study, linseed of the variety «Southern Night», which was obtained by harvesting in a single-phase method, was used. Then, linseed was cleaned. The initial moisture content of linseed was 14.3%. The experimental equipment worked as follows: air was pumped by a fan and heated by a heater; the heated air was supplied to the drying chamber by a flexible pipe. The sample of linseed was placed in the drying chamber of experimental equipment. The heater was equipped with a regulator for the temperature of the heated air.



**Fig. 1** – Experimental equipment for linseed drying:  
a – scheme of the equipment (1 – fan; 2 – heater; 3 – flexible branch pipe; 4 – drying chamber; 5 – section with linseed); b – drying chamber

**RESULTS AND DISCUSSION**

Linseed drying was carried out at drying agent temperatures of 35, 45, 55 and 65°C. The air flow rate in the drying chamber was 1.9–2.0 m/s and the thickness of the linseed layer was 2 cm. The results of the experimental studies are summarized in the graph shown in **Fig. 2**.

As a result of the reference analysis (Doymaz & Pala, 2003; Cihan et al., 2007; Yadollahinia et al., 2008; Rafiee Sh et al., 2009), mathematical models of drying process of bulk materials are summarized in **Table 1**.

In **Table 1**, the parameters are as follows: *MR* – coefficient of initial moisture content of the bulk material; *a*, *b*, *c*, *k*, *n* – coefficients determined by the properties of a bulk material, and the initial parameters of a bulk material, and drying modes;

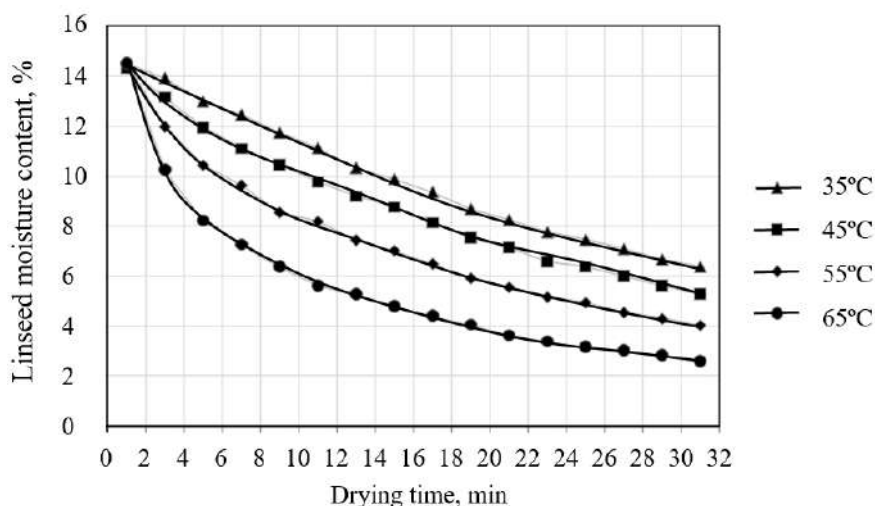
*t* – drying time, min.

Coefficient of initial moisture content of bulk material was calculated by Equation:

$$MR = \frac{W_{in.m.}}{W_m}, \tag{1}$$

where *W<sub>in.m.</sub>* – initial moisture content of bulk material, %; *W<sub>m.</sub>* – moisture content of bulk material at drying time *t*, %.

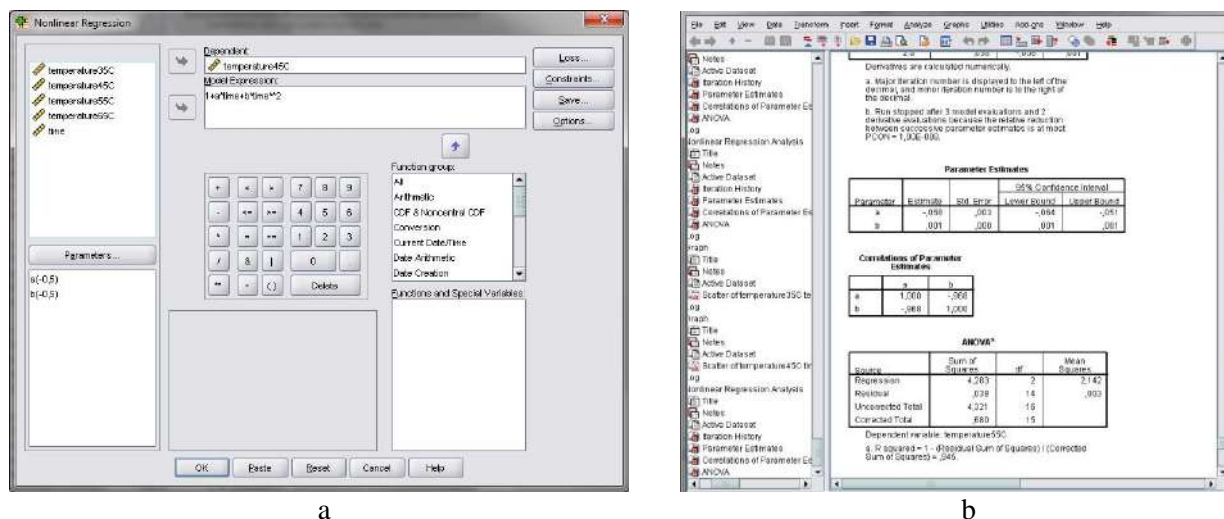
The coefficients of the drying process models presented in **Table 1** were obtained as a result of a non-linear regression analysis carried out using SPSS 17.0 software (**Fig. 3**). The experimental data of linseed drying was accurately reproduced by these drying process models (**Fig. 4**).



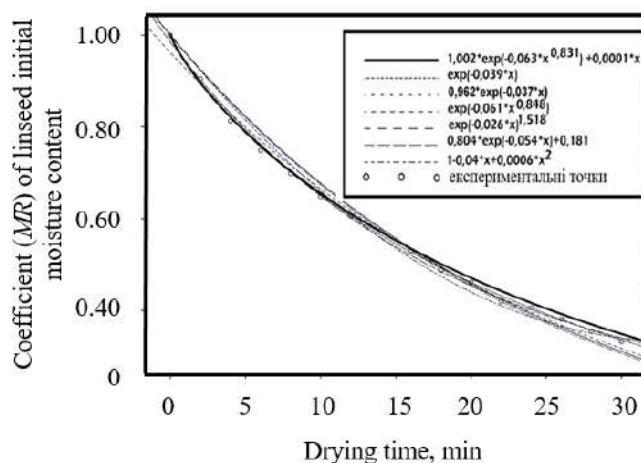
**Fig. 2** – Diagram of linseed moisture content during the drying process at different drying agent temperatures

**Table 1** –Mathematical models of drying process of bulk materials

Mathematical models of drying process	Model equation
1	2
Newton	$MR = e^{-kt}$
Henderson-Pabis	$MR = ae^{-kt}$
Page	$MR = e^{-kt^n}$
Modified Page	$MR = e^{-(kt)^n}$
Logarithmic	$MR = ae^{-kt} + c$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$



**Fig. 3** – Calculation of the coefficients of the drying process models using the SPSS 17 software: a – setting the calculation parameters; b – calculation results



**Fig. 4** – Diagrams obtained from different linseed drying process models at a drying agent temperature of 45°C

The accuracy of drying process models and their comparison was assessed using three indicators: coefficient of determination, sum of squared errors and standard mean square error. As a result of the comparison, the Midilli model was found to be the most accurate in this case. The calculated accuracy indicators for the Midilli model are shown in **Table 2**.

Coefficient of determination was calculated by Equation:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{cal,i} - MR_{ex,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_p - MR_{ex.av,i})^2}, \quad (2)$$

where  $MR_{cal,i}$  – calculated quantity;  $MR_{ex,i}$  – experimental quantity;  $MR_{ex.av,i}$  – experimental average quantity;  $N$  – observation number.

Sum of squared errors was calculated by Equation:

$$SSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{cal,i} - MR_{ex,i})^2}{N}. \quad (3)$$

Standard mean square error was calculated by Equation:

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{cal,i} - MR_{ex,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

The coefficients ( $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $n$ ) of the Midilli model, which accurately reproduces the kinetics of the linseed drying process, are summarized in **Table 3**.

The results of numerical modeling (**Fig. 5**)

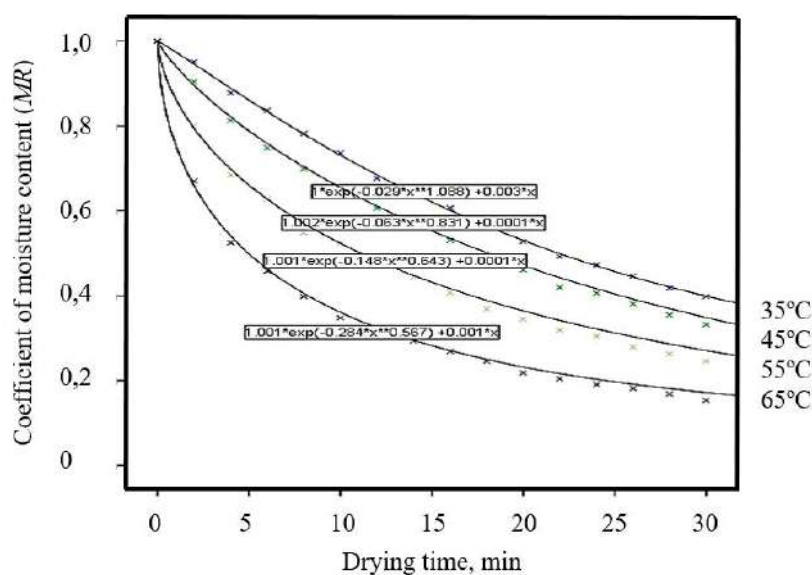
showed that the Midilli model reproduces possible drying modes. The simplicity of the modelling makes it possible to use modelling for a wide class of tasks in the management of drying processes in convective dryers.

**Table 2** – Calculated accuracy indicators for the Midilli model

Mathematical model	Temperature of drying agent, °C	Coefficient of determination $R^2$	Sum of squared errors $SSE$	Standard mean square error $RMSE$
1	2	3	4	5
Midilli	35	0.999	0.567	0.000
	45	0.999	0.616	0.000
	55	0.999	0.680	0.001
	65	0.999	0.755	0.001

**Table 3** – Coefficients of the Midilli model

Temperature of drying agent, °C	Coefficients of the Midilli model $MR = ae^{-kt^n} + bt$			
	$a$	$b$	$k$	$n$
1	2	3	4	5
35	1.000	0.003	0.029	1.088
45	1.002	0.001	0.063	0.831
55	1.001	0.001	0.148	0.643
65	1.001	0.001	0.284	0.567



**Fig. 5** – Results of numerical modeling of the linseed drying process using the Midilli model at different drying agent temperatures



### CONCLUSIONS

The obtained mathematical model of the linseed drying process takes into account the following parameters: type of drying, interaction of the seed with the drying agent, moisture content of the seed layer. The characteristics of the model must be agreed with the experimental results. Temperature, humidity and speed of the drying agent affect the duration of seed drying. It is necessary to find such a drying mode, that the best technological properties of the seeds can be obtained with the minimum drying time and the lowest heat consumption.

### REFERENCES

- Cihan, A., Kahveci, K., & Nacihafozöglu, O. (2007). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 293-298. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.057>
- Didukh, V. F. (2002). *Increasing the efficiency of drying agricultural materials (Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів)*. Lutsk: RVV LDTU. (in Ukrainian)
- Didukh, V. F., Dudarev, I. M., & Kirchuk, R. V. (2008). *Harvesting and primary processing of fibre flax (Збирання та первинна переробка льону-довгуниця)*. Lutsk: RVV LNTU. (in Ukrainian)
- Didukh, V., Kirchuk, R., & Yaschuk, A. (2013). Modeling of motion of material on the surface of spiral activator in bulk materials dryer. *ТЕКА. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 15(4), 140-146.
- Doymaz, I., & Pala, M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60, 125-130. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00025-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00025-6)
- Dudarev, I., & Kirchuk, R. (2011). Reasoning of technology and design parameters of oil flax harvesting machines. *INMATEH – Agricultural engineering*, 33(1), 37-42.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying*. CRC Press.
- Rafiee, Sh., Keyhani, A., Sharifi, M., Jafari, A., Mobli, H., & Tabatabaeefar, A. (2009). Thin layer drying properties of soybean (Viliamz Cultivar). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 11, 289-300.
- Yadollahinia, A. R., Omid, M., & Rafiee, S. (2008). Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products. *International Journal of Agriculture & Biology*, 10, 61-65.
- Yaschuk, A. A., & Kirchuk, R. V. (2011). Study of the drying kinetics of linseed with development of the dryer design (*Дослідження кінетики сушіння насіння льону олійного з розробкою конструкції сушарки*). *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 41(1), 309-314. (in Ukrainian)
- Yaschuk, A., Kirchuk, R., & Dudarev, I. (2013). Research of the process of aeration of a layer of bulk material. *INMATEH – Agricultural engineering*, 40(2), 73-79.

**JUSTIFICATION OF OPERATING MODES FOR PNEUMOTHERMAL MOBILE EQUIPMENT FOR SEPARATION OF SCOTS PINE NEEDLES****A. Herasymchuk\*, O. Tkachuk***Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine***ABSTRACT**

*The growing demand for natural textile materials is driving the search for fundamentally new raw materials for the production of textile fibres, in particular the use of pine needles for the production of textile fibres. The development of a technology for processing Scots pine needles at logging sites using a pneumothermal method with the help of a mobile equipment for separating pine needles requires research in order to substantiate its operating principles. In particular, it is necessary to substantiate the temperature and duration of drying and the amount of vacuum for the pine needle drying process. The use of pine needles, which represent up to 30% of the mass of the crown of a Scots pine, is an important factor in their processing and thus a more complete use of forest resources. Industrial processing of pine crowns requires the separation of needles from wood and bark, which are harmful impurities during the production of textile fibre. Experimental studies were carried out on branches with pine needles. The dimensions of the pine needles were determined and the minimum needle removal force that could be achieved in the drying chamber of the mobile equipment was determined. A two-factor experiment was used to determine the equation of the pine needle removal force on temperature and drying time. The minimum pull-off force was compared with the pull-off forces at different temperatures and drying times. As a result of the studies carried out to justify the operating modes of the mobile equipment for the pine needle separation, the parameters of the drying process have been established: drying temperature 80°C, drying time 90 minutes. Further research is required to establish the level of vacuum in the drying chamber of the mobile equipment, and to determine the dependence of the pine needle removal force on the temperature and drying time in other ranges of variation of these parameters.*

**Key words:**

Scots pine needles,  
pine needle detachment force,  
pine needle drying temperature,  
pine needle drying time,  
vacuum level

**Article history:**

Received 14.05.2023

Accepted 13.06.2023

**\*Corresponding author:**

alexgop2017@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1025

**To cite this article:**

Herasymchuk, A., & Tkachuk, O. (2023). Justification of operating modes for pneumothermal mobile equipment for separation of Scots pine needles. *Agricultural Machines*, 49, 75-80. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025>

УДК 630\*8:677.1

**ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ПНЕВМОТЕРМІЧНОЇ МОБІЛЬНОЇ  
УСТАНОВКИ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ****О.П. Герасимчук\*, О.Л. Ткачук***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Зростаючий попит на природні текстильні матеріали обумовлює пошук принципово нових сировинних ресурсів для виробництва текстильних волокон, зокрема використання хвої сосни звичайної для отримання текстильних волокон. Розроблення технології перероблення хвої сосни звичайної на місцях лісозаготівлі з використанням пневмотермічного способу за допомогою мобільної установки для відокремлення хвої потребує досліджень з метою обґрунтування режимів її роботи. Зокрема необхідно обґрунтувати температуру й тривалість сушіння та величину вакууму для процесу сушіння хвої. Використання хвої, яка складає до 30% маси крони сосни звичайної, є важливим фактором її перероблення, а отже більш повного використання лісових ресурсів. Промислове перероблення крони сосни звичайної потребує відокремлення хвої від деревини та кори, які є шкідливими домішками під час виробництва текстильного волокна. Експериментальні дослідження проводилися на гілках з хвоєю сосни звичайної. Було визначено розміри хвої, встановлено мінімальне зусилля відривання хвої, яке можна забезпечити в сушильній камері мобільної установки. Із використанням двофакторного експерименту визначено залежність зусилля відривання хвої від температури та тривалості сушіння. Виконано порівняння мінімального зусилля відривання із зусиллями відривання за різних температур та часу сушіння. У результаті проведених досліджень з обґрунтування режимів роботи мобільної установки для відокремлення хвої встановлено параметри процесу сушіння: температура сушіння 80°C, тривалість сушіння 90 хв. Обґрунтування величини вакууму в сушильній камері мобільної установки, встановлення залежності зусилля відривання хвої від температури та тривалості сушіння в інших діапазонах зміни цих параметрів потребує подальших досліджень.

**Ключові слова:**

хвоя сосни звичайної,  
зусилля відривання хвої,  
температура сушіння хвої,  
тривалість сушіння хвої,  
величина вакууму

**Історія публікації:**

Отримано 14.05.2023

Затверджено 13.06.2023

**\*Автор для листування:**

alexgor2017@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1025

**Цитувати цю статтю:**

Герасимчук, О. П., & Ткачук, О. Л. (2023). Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відокремлення хвої сосни звичайної. *Сільськогосподарські машини*, 49, 75-80. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зростаючий попит на природні текстильні матеріали обумовлює пошук принципово нових сировинних ресурсів для виробництва текстильних волокон. Одним із перспективних напрямів таких досліджень є використання для отримання текстильних волокон хвої сосни звичайної (Gupta et al., 2020; Ткачук & Герасимчук, 2021; Mandal et al., 2022; Herasymchuk & Tkachuk, 2023).

Використання хвої, яка складає до 30% маси крони сосни звичайної, є важливим фактором її перероблення, а отже більш повного використання лісових ресурсів. Промислове перероблення крони потребує відокремлення хвої від деревини та кори, які є шкідливими домішками під час виробництва текстильного волокна. Перероблення хвої може проходити за допомогою мобільної установки, яка містить сушильну камеру, вакуумну систему пневмотранспортування та накопичувач хвої (Ткачук та ін., 2022). Для ефективної роботи цієї установки необхідно провести дослідження з метою обґрунтування режимів її роботи. Зокрема, потребують визначення величина вакууму, температура й тривалість попереднього сушіння хвойних гілок для послаблення зв'язку між хвоєю та гілками, а також потребує досліджень процес відокремлення хвої потоком повітря. Отже, розроблення технології перероблення хвої сосни звичайної на місцях лісозаготівлі та обґрунтування режиму роботи обладнання для реалізації цієї технології є актуальним завданням досліджень.

**Мета дослідження** – обґрунтування режиму роботи (температури та тривалості сушіння) мобільної установки, що призначена для відокремлення хвої, функціонування якої ґрунтується на пневмотермічному способі.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В якості матеріалу для проведення дослідження використовували гілки хвої сосни звичайної (рис. 1, а), що були зібрані із нижньої частини крони дерев. Хвоя розташовується на пагонах пучками по дві хвоїнки (рис. 1, б). У перерізі хвоя сосни звичайної має форму, що подібна до кругового сегмента (рис. 1, в).

Довжину хвої сосни звичайної вимірювали штангенциркулем, а розміри її поперечного перерізу – цифровим мікроскопом Levenhuk (DXT 90) з можливістю збільшення від 10 до 300 крат. Зображення хвої, які отримали за допомогою цифрового мікроскопа, обробляли із використанням MicroCapture Plus (рис. 2).

Для обчислення геометричних параметрів хвої припускали, що її форма – це зрізаний вздовж осі циліндр (рис. 3). Це дозволило провести обчислення площ проєкцій моделі хвої з достатньою для технічних розрахунків точністю. Площі проєкцій хвої з розмірами  $l$ ,  $c$  та  $h$  (рис. 3) обчислювали за виразами:

- фронтальна проєкція:

$$S_f = lc ; \quad (1)$$

- горизонтальна проєкція:

$$S_g = R^2 \arcsin\left(\frac{c}{2R}\right) - \frac{c}{4} \sqrt{4R^2 - c^2} ; \quad (2)$$

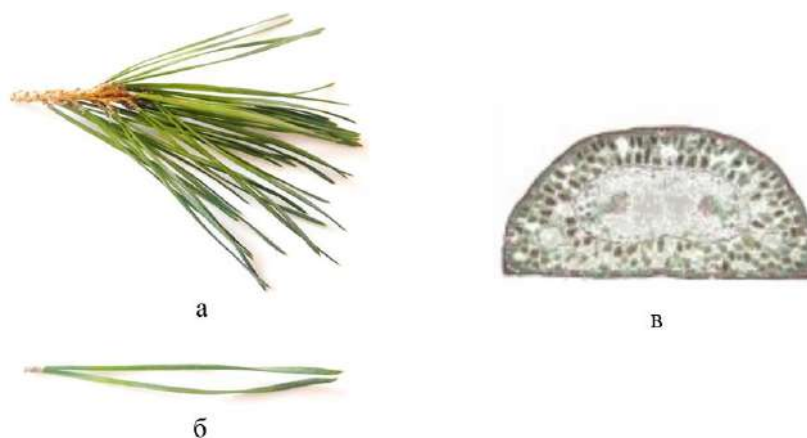


Рис. 1 – Хвоя сосни звичайної:

а – гілка із хвоєю; б – пучок хвої; в – поперечний переріз хвої



Рис. 2 – Визначення розмірів хвої сосни звичайної:

а – цифровий мікроскоп Levenhuk (DXT 90); б – оброблення зображення у програмі MicroCapture Plus

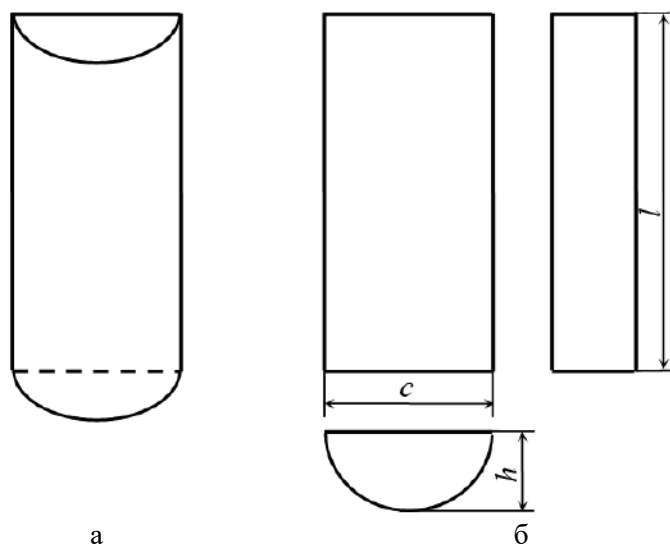


Рис. 3 – Геометричні параметри моделі хвої сосни звичайної:

а – прийнята форма моделі хвої; б – проекції з розмірами моделі хвої

$$\text{де } R = \frac{h}{2} + \frac{c^2}{8h};$$

- профільна проекція:

$$S_p = lh. \quad (3)$$

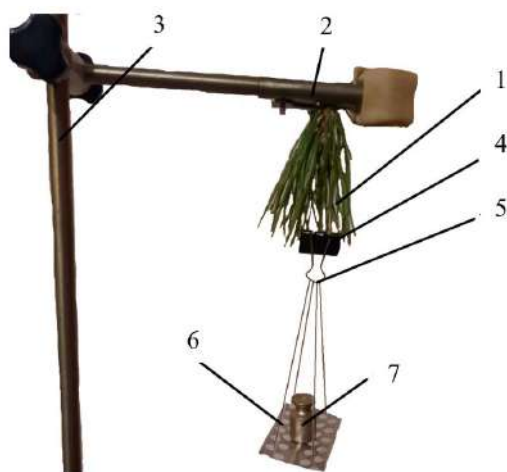
Мінімальні розміри хвої сосни звичайної, що досліджувалася, становили:  $l_{\min} = 70$  мм,  $c_{\min} = 1,3$  мм,  $h_{\min} = 0,65$  мм.

Сушіння гілок сосни з хвоєю проходило в сушильній лабораторній шафі (рис. 4). Зусилля відривання визначали на установці (рис. 5), в якій гілку з хвоєю закріплювали в затискачі штатива. До хвої сосни за допомогою другого

затискача та нитки кріпили платформу, на яку встановлювали вантажі до моменту відривання хвої сосни від гілки. Зусилля відривання хвої визначали за масою вантажів.



Рис. 4 – Сушіння хвої в сушильній шафі



**Рис. 5** – Визначення зусилля відривання хвої:  
1 – гілка з хвоєю; 2, 4 – затискачі; 3 – штатив;  
5 – нитка; 6 – платформа; 7 – вантаж

Дослідження впливу температури  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $x_1$  – кодований фактор) та тривалості сушіння  $\tau$  (хв) ( $x_2$  – кодований фактор) хвої на зусилля відривання проводили із використанням методу планування експерименту. План-матриця двофакторного експерименту подана в таблиці 1.

**Таблиця 1** – План-матриця проведення двофакторного експерименту

Номер досліджу	Значення кодованих факторів		Взаємодія факторів $x_1x_2$
	$x_1$	$x_2$	
1	2	3	4
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

**Таблиця 2** – Результати визначення зусилля відривання хвої

Номер досліджу	Температура сушіння $x_1$	Тривалість сушіння $x_2$	Зусилля відривання $y$ , Н (за повтореннями)			Середнє зусилля відривання $\bar{y}_u$ , Н	Оцінка дисперсії $S_u^2$
			$y_{u1}$	$y_{u2}$	$y_{u3}$		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	1,01	1,13	1,83	1,323	0,1960
2	+1	-1	0,75	0,10	0,53	0,460	0,1090
3	-1	+1	0,95	0,42	0,20	0,523	0,1490
4	+1	+1	0,04	0,02	0,01	0,023	0,0002

Повторюваність усіх проведених дослідів  $m = 3$ . Оброблення експериментальних даних виконували за допомогою комп'ютерної програми MathCAD 14.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Ураховуючи технічні характеристики механічних вакуумних насосів та втрати тиску в трубопроводах мобільної установки для відокремлення хвої, припускаємо, що різниця тисків у камері установки  $\Delta p = 60000$  Па. Тоді мінімальне зусилля, яке діє на хвою в мобільній установці, становитиме  $F_{\min} = 0,04$  Н. Результати експериментального визначення зусилля відривання хвої сосни після сушіння хвойних гілок за температур  $40\text{--}80^{\circ}\text{C}$  тривалістю  $40\text{--}90$  хв, середнє арифметичне значення зусилля відривання та оцінки дисперсії подані в таблиці 2.

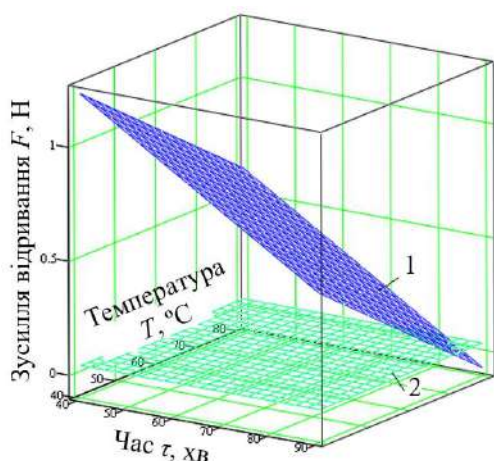
Вплив на зусилля відривання хвої сосни температури сушіння описується рівнянням:

$$F = 2,396 - 0,015T - 0,014\tau, \quad (4)$$

де  $F$  – зусилля відривання хвої сосни, Н;  $T$  – температура сушіння хвої,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – тривалість сушіння хвої, хв.

За рівнянням (4) побудована поверхня відгуку (рис. 6). На рис. 6 зображена площина, що відповідає мінімальному зусиллю, яке діє на хвою в мобільній установці. Усі точки поверхні відгуку, що побудована за рівнянням (4), які лежать нижче площини, забезпечують відокремлення хвої від гілок. Отже, для забезпечення відокремлення хвої від гілок за величини вакууму  $\Delta p = 60000$  Па, хвою потрібно висушити за температури  $t = 80^{\circ}\text{C}$  упродовж  $\tau = 90$  хв.





**Рис. 6** – Графічні залежності:

1 – поверхня відгуку, що побудована за рівнянням (4); 2 – площина, що відповідає мінімальному зусиллю відривання хвої

### ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження відокремлення хвої у мобільній установці, що містить сушильну камеру, вакуумну систему пневмотранспортування та збірник хвої, рекомендовано параметри процесу сушіння: температуру сушіння  $80^{\circ}\text{C}$  та тривалість сушіння 90 хв. У подальших дослідженнях доцільно теоретично та експериментально обґрунтувати величину вакууму в сушильній камері мобільної установки, дослідити залежність зусилля відривання хвої від

температури та тривалості сушіння в інших діапазонах зміни цих параметрів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Gupta, P. K., Joshi, G., Rana, V., Rawat, J. S., & Sharma, A. (2020). Utilization of pine needles for preparation of sheets for application as internal packaging material. *Indian Forester*, 146(6), 538-543. <http://dx.doi.org/10.36808/if%2F2020%2Fv146i6%2F150420>
- Herasymchuk, O., & Tkachuk, O. (2023). Regarding the question of obtaining natural textile fibers from pine needles In *The V-th International Symposium Creativity. Technology. Marketing*. Chişinău, Republic of Moldova.
- Mandal, S., Sharma, R. K., Bhattacharya, T. K., Tanna, H., & Haydary, J. (2022). Charring of pine needles using a portable drum reactor. *Chemical Papers*, 76, 1239-1252. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01893-4>
- Ткачук, О., & Герасимчук, О. (2021). Стан та перспективи застосування деревної целюлози для виробництва хімічних волокон (*The state and prospects of the use of wood pulp for the production of chemical fibers*). В *IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference* (с. 204-205). Хмельницький, Україна.
- Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Резнікова, В. В. (2022). Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон (*Pneumothermal method of obtaining coniferous needles for production of textile fibers*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 67-73. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842>

## CALCULATION OF PULLING SECTION OF DISC-BELT FLAX-PULLING DEVICE

S.M. Yukhymchuk\*, S.F. Yukhymchuk, M. Tolstushko, L. Datsyuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



## ABSTRACT

*Pullers are used to pull the fibre flax stalks out of the ground during mechanised harvesting. The most common are belt pullers and belt disc pullers. Pulling belts are made of rubber reinforced with kapron threads. They stretch during operation and need to be tightened periodically and replaced when worn. This type of puller is also very metal intensive. This article describes the design of the disc-belt flax puller, which will increase the life of the pulling belts and reduce the metal consumption of the flax pulling machine. The disc-belt flax puller consists of a pre-fabricated frame with partitions, a pulling device and a cross conveyor. The pulling device is made in the form of active pulling disks that contact with pulling belts, each of which is mounted on two rollers, one of which is spring-loaded. The proposed disc-belt flax puller contains fewer parts than known designs. Therefore, the proposed disc-belt flax puller has a lower metal capacity compared to its counterparts. The power required to drive the pulling section is determined, which consists of the power required to drive the press belt mechanism, to pull the flax stalks from the ground and to transport the stalks. The required pressure of the press belt on the pulling disc is determined on the condition that the flax stalks do not slip in the pulling pit during pulling. Taking into account the inertial load of the flax stalks during the movement of the curved pulling stream, the amount of pressure relief in the pulling stream was also determined. The required pressure in the draw stream is provided by tensioning the roving belt with a spring-loaded tensioning device. An improved design of the tensioning device is proposed. The required belt tension is calculated and the compression spring of the tensioning device is selected. The additional tension of the roving belt as the roving stream is filled with flax stalks is also determined. A hydraulic motor is selected to drive the picking section of the disc belt flax puller. A drawing sketch of the drive of the pulling disc was developed.*

**Key words:**

flax pulling,  
flax stalks,  
disc-belt pulling device,  
pulling stream,  
drive power

**Article history:**

Received 11.05.2023

Accepted 14.06.2023

**\*Corresponding author:**

uyhimchyksveta@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1023

**To cite this article:**

Yukhymchuk, S. M., Yukhymchuk, S. F., Tolstushko, M., & Datsyuk, L. (2023). Calculation of pulling section of disc-belt flax-pulling device. *Agricultural Machines*, 49, 81-89. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1023>

УДК 631.358

**РОЗРАХУНОК БРАЛЬНОЇ СЕКЦІЇ ДИСКОВО-ПАСОВОГО  
ЛЬОНОБРАЛЬНОГО АПАРАТА****С.М. Юхимчук\*, С.Ф. Юхимчук, М.М. Толстушко, Л.М. Дацюк***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Для витягування стебел льону-довгунця з ґрунту під час збирання використовуються бральні апарати. Найбільш поширеними є пасові та пасово-дискові бральні апарати. Бральні паси виготовляють з гуми, що армована капроновими нитками. Вони розтягуються та потребують періодичного підтягування, а у випадку зношування – заміни. Також ці конструкції бральних апаратів є металомісткими. У статті запропоновано конструкцію дисково-пасового льонобрального апарата, яка дозволить підвищити довговічності бральних пасів та зменшити металомісткість льонозбиральної машини. Дисково-пасовий льонобральний апарат містить збірну раму та розташовані на ній подільники, бральний вузол і поперечний транспортер. Бральний вузол виконано у вигляді активних бральних дисків, що контактують із бральними пасами, кожен з яких встановлений на двох роликах, один з яких підпружинений. Визначено потужність, що необхідна для приводу бральної секції, яка складається із потужностей, що необхідні для приводу притискного пасового механізму, витягування стебел льону з ґрунту та транспортування стебел бральним ривчаком. З умови непроковзування стебел у бральному ривчаку під час їх брання визначено необхідний тиск брального паса на бральний диск. Також, урахувавши інерційне навантаження стебел під час руху криволінійним бральним ривчаком, визначено величину послаблення тиску у бральному ривчаку. Необхідний тиск у бральному ривчаку забезпечується натягом брального паса підпружиненим натяжним пристроєм. Також удосконалено конструкцію натяжного пристрою. Обчислено необхідний натяг брального паса та підібрано пружину стискання натяжного механізму. Вибрано гідромотор для приводу бральної секції дисково-пасового льонобрального апарата. Розроблено ескіз креслення приводу брального диска.

**Ключові слова:**

брання льону,  
стебла льону,  
дисково-пасовий бральний  
апарат,  
бральний ривчак,  
потужність приводу

**Історія публікації:**

Отримано 11.05.2023  
Затверджено 14.06.2023

**\*Автор для листування:**

uyhimchuksveta@gmail.com

**DOI:** 10.36910/acm.vi49.1023**Цитувати цю статтю:**

Юхимчук, С. М., Юхимчук, С. Ф., Толстушко, М. М., & Дацюк, Л. М. (2023). Розрахунок бральної секції дисково-пасового льонобрального апарата. *Сільськогосподарські машини*, 49, 81-89. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1023>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час механізованого збирання для витягування стебел льону-довгунця з ґрунту використовуються бральні апарати. Найбільш поширеними є пасові і пасово-дискові бральні апарати (Дацюк та ін., 2012; Дідух та ін., 2013; Дударев, 2015; DEHONDT Technologies, n.d.; Union, n.d.). У пасових бральних апаратах стебла затискаються між двома бральними пасами, що працюють як пасові передачі, в яких робоча гілка паса є натяжною. Пас охоплює ведучий і ведений шків або ведучий шків та натяжні ролики. У пасово-дискових бральних апаратах стебла льону затискаються між бральним пасом та бральним диском. Бральний диск обертається від контакту з бральним пасом, тобто бральний пас більше навантажений, ніж у пасовому бральному апараті. Бральні паси виготовляють з гуми, що армована капроновими нитками. Бральні паси під час роботи розтягуються та потребують періодичного підтягування, а у випадку зношування – заміни. Ці конструкції бральних апаратів є металомісткими, оскільки містять шків, натяжні та підтримуючі ролики, складний привод. Отже, актуальним завданням є розроблення конструкції брального апарата, що усувала б зазначені недоліки.

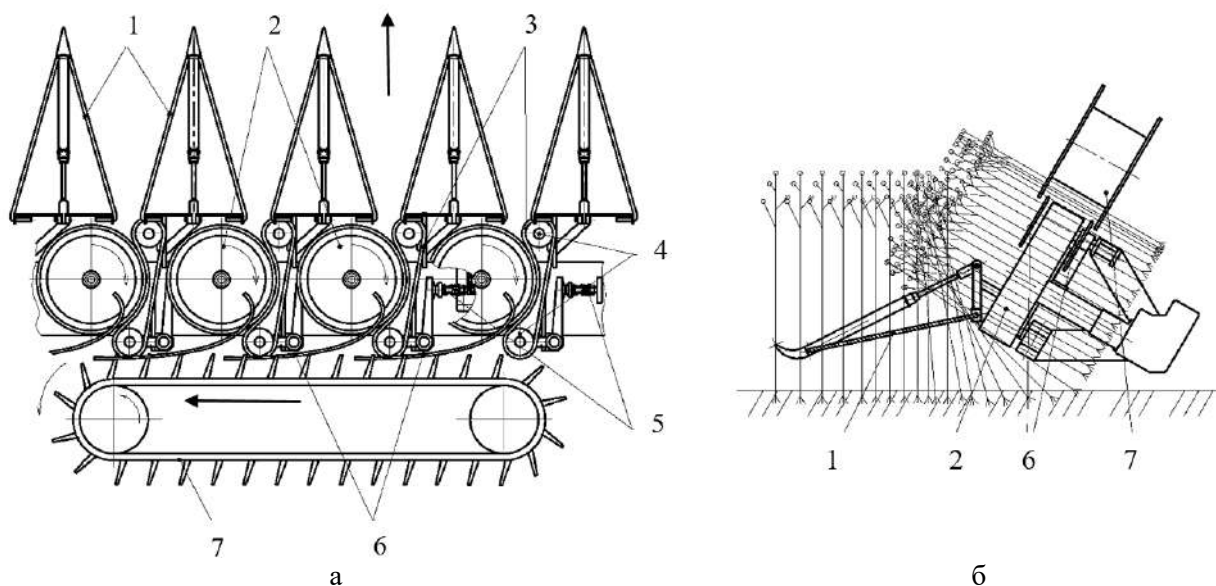
У науковій праці (Юхимчук та ін., 2022b) запропоновано конструкцію дисково-пасового брального апарата. У цьому бральному апараті приводяться безпосередньо бральні диски, а паси притискають стебла льону до поверхні бральних дисків. Під час розроблення нового льонобрального апарата були встановлені недоліки його конструкції. Зокрема, під час транспортування стебел льону бральними ривчаками має місце згинання нижньої частини стебел внаслідок їх взаємодії із картером механізму приводу бральних дисків. На коренях стебел можуть бути залишки ґрунту, що спричинить налипання ґрунту на корпус картера під час ковзання стебел. Як наслідок, це зумовить додаткові енергетичні витрати, причиною яких є протидія стебел згинанню та тертя стебел по корпусу картера. Для усунення недоліків пропонується замінити механічний привод бральних дисків на гідравлічний (Юхимчук та ін., 2022b). Кожен бральний диск приводиться від окремого гідромотора. Вал брального диска обертається в трубі, яка закріплена консольно, та з'єднаний через

шліцьову муфту із валом гідромотора. Довжина консольної труби вибрана такою, щоб унеможливити зачеплення нижньої частини стебел льону-довгунця, які затиснуті в бральному ривчаку апарата, за елементи рами льонобралки. Також для зменшення габаритів пружини натяжного механізму була змінена його конструкція. Пропонується встановити натяжний ролик на одному кінці коромисла, а пружину стискання – на другому. Плече кріплення натяжного ролика є меншим за плече взаємодії з пружиною.

На **рис. 1** подана схема удосконаленого дисково-пасового льонобрального апарата, що містить: збірну раму (на **рис. 1** – не показана); подільники; бральний вузол, що містить бральні диски, бральні паси, ролики, підпружинені кріплення, напрямні прутки, поперечний транспортер.

Привод бральних дисків льонобрального апарата, які обертаються в однаковому напрямку, здійснюється з картера рами. З одного боку усі бральні диски охоплюються бральним пасом, який надітий на ролики. Оскільки верхній ролик підпружинений, то забезпечується постійний натяг брального паса та тиск в бральному ривчаку. Під час руху льонозбиральної машини полем подільники поділяють стебла льону на окремі смужки та спрямовують їх у гирла бральних ривчаків. Стебла льону-довгунця затискаються між контактуючими поверхнями бральних дисків та бральних пасів, витягуються з ґрунту та спрямовуються до виходу з бральних ривчаків, де захоплюються пальцями поперечного транспортера. Стебла, ковзаючи поверхнею напрямних прутків, спрямовуються до виходу з дисково-пасового льонобрального апарата. Залежно від типу льонозбиральної машини стрічка стебел або розстеляється на льонищі, або подається на наступні робочі органи льонозбиральної машини для обчисування насінневих коробочок.

Бральний вузол містить менше деталей, ніж відомі конструкції. Отже, запропонований дисково-пасовий льонобральний апарат має меншу металомісткість порівняно з аналогами. Внаслідок того, що бральні паси не передають тягових зусиль, а виконують лише затискання та утримування стебел льону-довгунця, а також підпружинення верхніх роликів, забезпечується підвищення довговічності бральних пасів.



**Рис. 1** – Види зверху (а) та збоку (б) дисково-пасового льнобрального апарата:

1 – подільники; 2 – бральні диски; 3 – бральні паси; 4 – ролики; 5 – підпружинені кріплення; 6 – напрямні прутки; 7 – поперечний транспортер

У науковій праці (Юхимчук та ін., 2022b) були обґрунтовані геометричні розміри бральної секції: ширина захвату бральної секції – 0,38 м; радіус обгумованого брального диска – 0,16 м; діаметр роликів пасової передачі – 0,08 м; товщина брального пасу – 10 мм; довжина брального пасу – 1 м; ширина брального диска та брального пасу – 0,1 м; кут охоплення брального диска бральним пасом – 80 град, що в перерахунку на довжину зони охоплення становить – 0,24 м; кут нахилу площини брального апарата до горизонту – 60 град; висота брання – 0,2 м.

У науковій праці (Юхимчук та ін., 2022a) обґрунтовано кінематичний режим роботи льнобрального апарата: швидкість машини – 2,01 м/с; колова швидкість брального диска або швидкість брального пасу – 2,35 м/с, що відповідає показнику швидкісного режиму брального апарата – 0,85.

Для проведення обчислень приймалися характеристики стеблостою льону-довгунця: густина стеблостою (кількість рослин на 1 м<sup>2</sup> площі поля) – 1600 шт/м<sup>2</sup>; середній діаметр стебла – 1,5 мм; середня маса стебла – 1,2 г; коефіцієнт тертя стебел льону по гумовій поверхні – 0,8; сила опору стебла витягуванню з ґрунту – 5 Н.

**Мета дослідження** – визначити значення потужності для приводу бральної секції

дисково-пасового льнобрального апарата, а також вибрати пружину стискання натяжного механізму брального пасу та гідромотора приводу бральної секції.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Теоретичні дослідження проводилися із використанням основних положень вищої математики, фізики та теоретичної механіки, а також деталей машин. Розрахунок пружини стискання та графічні побудови проводилися із використанням комп'ютерних програм.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Потужність, що необхідна для приводу бральної секції, складається із потужностей, що необхідні для приводу притискного пасового механізму, витягування стебел льону з ґрунту та транспортування стебел бральним рівчаком.

Для розрахунку натягу брального пасу та тиску в бральному рівчаку необхідно знати силу  $Q$ , що є сумою складових сил опору  $P_i$  стебел витягуванню, та яка припадає на дугу охоплення  $L$  брального диска бральним пасом:

$$Q = \sum_{i=1}^{i_L} P_i, \quad (1)$$

де  $i_L$  – кількість стебел льону в зоні  $L$ , шт.

Кількість стебел льону в зоні  $L$ :

$$i_L = Bi_0 L \mu, \quad (2)$$

де  $B$  – ширина захвату бральної секції, м;  $i_0$  – кількість стебел на  $1 \text{ м}^2$  площі поля, шт/м<sup>2</sup>;  $L$  – довжина дуги охоплення брального диска бральним пасом, м;  $\mu$  – показник швидкісного режиму льонобрального апарата  $\mu = V_m / V_p$ ;  $V_m$  – швидкість збиральної машини, м/с;  $V_p$  – колова швидкість брального диска, м/с.

Точне визначення цих сил ускладнене, оскільки вони залежать від умов закріплення коренів стебел у ґрунті, нахилу стебел льону, вологості ґрунту та інших факторів.

Потужність також буде затрачатися на привод брального паса, який забезпечує притискання стебел льону-довгунця до поверхні брального диска. Після затягування у бральний ривчак і затискання стебла рухаються разом із бральним диском та бральним пасом. Між поверхнями стебел і диском та пасом виникають сили тертя. Якщо ці сили рівні опору стебел витягуванню, то проходить брання льону, причому стебла будуть витягуватися без ковзання, якщо сили тертя не досягли максимуму. Якщо сили тертя досягли максимуму, то стебла будуть витягуватися із ковзанням. Якщо максимальна сила тертя менша за опір стебла витягуванню, то замість брання буде мати місце ковзання стебел у бральному ривчаку.

Початковий натяг брального паса апарата визначимо з урахуванням того, що пас має забезпечувати необхідний тиск у бральному ривчаку для того, щоб стебла льону надійно затискалися і не проковзували під час брання. Сила затискання стебел у ривчаку залежить від їх розташування. Якщо стебла розташовані рідко в ривчаку, то на будь-яке стебло діє тиск ділянки, яка більша за діаметр стебла. У випадку розташування стебел у рядок, на кожне стебло діє тиск ділянки, довжина якої приблизно рівна діаметру стебла. Той самий тиск діє на стебло, якщо в ривчаку затиснуті кілька стебел, що розташовані у кілька рядків. Максимальна сила тертя між стеблом льону та поверхнями брального диска й брального паса, за умови, що вісь стебла перпендикулярна напрямку брального ривчака, становить:

$$F_m = 2B_p d_c f q, \quad (3)$$

де  $B_p$  – ширина брального ривчака, яка рівна товщині брального диска і ширині брального паса, м;  $d_c$  – середній діаметр стебла, м;  $f$  – коефіцієнт тертя стебла льону по гумових поверхнях брального диска та брального паса, коли стебла затискаються в один рядок або коефіцієнт тертя стебла льону по стеблу льону, якщо стебла затискаються в кілька рядків;  $q$  – середній тиск у бральному ривчаку, Па.

Якщо стебло розглядати як гнучку нитку, то сила  $F_m$  повинна бути більшою або рівною силі  $P$  опору стебла витягуванню з ґрунту. Тоді умова брання стебел матиме вигляд:

$$q \geq \frac{P}{2B_p d_c f}. \quad (4)$$

За значень  $P = 5 \text{ Н}$ ,  $B_p = 0,1 \text{ м}$ ,  $d_c = 1,5 \text{ мм}$  та  $f = 0,8$  матимемо умову (4):  $q \geq 41,7 \text{ кПа}$ . Тобто тиск у бральному ривчаку має бути більшим за  $q = 42 \text{ кПа}$ . Значне збільшення тиску  $q$  не є доцільним, оскільки це може спричинити плющення стебел. Позначимо через  $[q]$  допустимий тиск на стебла в ривчаку за якого стебла не розплющуються. Відповідно до наукових джерел (Хайліс, 2009; Хайліс, 2011) тиск –  $[q] = 190 \text{ кПа}$ . Якщо врахувати інерційне навантаження стебел під час руху криволінійним бральним ривчаком, то в умові (4) необхідно зробити поправку.

Елементарна відцентрова сила, яка з'являється під час руху елемента шару стебел довжиною  $ds$ , рівна (без урахування товщини шару стебел) (Хайліс, 2011):

$$\begin{aligned} dP_i &= Bi_0 m_c \mu \frac{V_p^2}{R_0} ds = \\ &= Bi_0 m_c V_m \frac{V_p}{R_0} ds, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $m_c$  – маса стебла, яке рухається бральним ривчаком, кг.

Під впливом сили  $dP_i$  зменшується тиск на бральний диск на величину:

$$\Delta q = \frac{Bi_0 m_c V_m V_p}{B_p R_0}. \quad (6)$$

Якщо прийняти  $B = 0,38 \text{ м}$ ,  $i_0 = 1600 \text{ шт/м}^2$ ,  $m_c = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ ,  $V_m = 2,01 \text{ м/с}$  та  $V_p = 2,35 \text{ м/с}$ ,



$B_p = 0,1$  м та  $R_\delta = 0,16$  м, тоді за виразом (6) отримаємо  $\Delta q = 270$  Па.

Тиск у бральному ривчаку також дещо зменшується внаслідок дії відцентрової сили інерції брального паса, що охоплює бральний диск. У випадку брання свіжих стебел льону їх поверхня покрита воском, тому поверхні диска та паса можуть бути мокрими, тобто коефіцієнт тертя буде меншим. Ураховуючи зменшення тиску внаслідок дії відцентрових сил та зменшення сил тертя, приймаємо тиск –  $q = 60$  кПа.

Момент опору в приводі брального паса враховується під час визначення загальної потужності приводу бральної секції. Сила, яку необхідно прикласти вздовж брального паса для подолання опорів, які виникають при його вигинах і терті в опорах роликів, визначається за виразом (Хайліс, 2011):

$$T = k(S_n + S_\delta), \quad (7)$$

де  $S_n$  – сила початкового натягу паса, Н;  $S_\delta$  – сила додаткового натягу паса внаслідок пропускання стебел через бральний ривчак;  $k$  – коефіцієнт, який для паса, що охоплює два ролика та згинається по бральному диску, рівний 0,09–0,10.

Силу початкового натягу паса визначимо з умови забезпечення необхідного тиску в бральному ривчаку за виразом (Хайліс, 2011):

$$S_n = qB_p R_p = qB_p \left( R + \frac{\Delta}{2} \right), \quad (8)$$

де  $R$  – радіус брального диска, м;  $\Delta$  – товщина брального паса, м.

За значень  $q = 60$  кПа,  $B_p = 0,1$  м,  $R_\delta = 0,16$  м та  $\Delta = 0,01$  м матимемо за виразом (8):  $S_n = 1$  кН. Оскільки один із роликів пасової передачі підпружинений, то для забезпечення натягу гілки паса  $S_n$  цей ролик повинен натягувати весь пас із зусиллям  $F_n = 2S_n$ .

У запропонованій конструкції бральної секції (рис. 2) натяжний ролик брального паса розташовано на важелі коромисла, а другий важіль коромисла впирається на пружину стискування. Плечі розташування осі ролика та осі пружини до центра обертання коромисла, відповідно, рівні  $L_p = 0,1$  м та  $L_{np} = 0,1$  м. Це значить, що пружина за робочої деформації повинна створювати силу:

$$F_{np} = \frac{F_n L_p}{L_{np}} = \frac{2S_n L_p}{L_{np}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 0,1}{0,15} = 1,33 \text{ кН}. \quad (9)$$

Із використанням комп'ютерної програми «Компас» була вибрана пружина стискування з параметрами, що подані в таблиці.

Визначимо силу  $S_\delta$  додаткового натягу брального паса внаслідок пропускання стебел через бральний ривчак. Коли у бральному ривчаку знаходиться шар стебел товщиною  $\Delta_{ш}$ , то гілка брального паса відходить від поверхні брального диска на цю величину за усією довжиною брального ривчака  $L$ . Тобто зона притискання стебел гілкою брального паса збільшиться на величину  $\Delta L = \Delta_{ш} \alpha$  (де  $\alpha$  – кут охоплення брального диска пасом, рад).

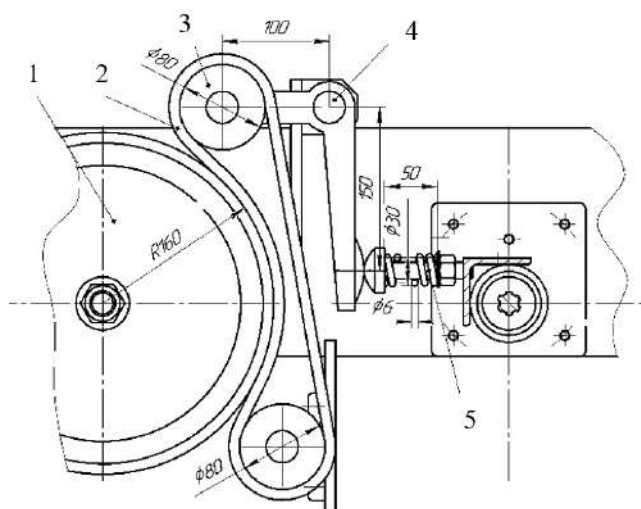


Рис. 2 – Конструкція натяжного механізму брального паса:

1 – бральний диск; 2 – бральний пас; 3 – натяжний ролик; 4 – коромисло; 5 – пружина стискування

Таблиця – Результати обчислень циліндричної пружини стискання за допомогою комп'ютерної програми Компас

Назва параметра	Позначення	Значення (властивість)
1	2	3
Матеріал	-	дріт Б-2А-П-6.20
Клас	-	2
Розряд	-	2
Відносний інерційний зазор	-	0,20
Зовнішній діаметр пружини, мм	$d_1$	30,0
Діаметр дроту, мм	$d_1$	6,2
Число робочих витків, шт	$n$	6,5
Повні кількість витків, шт	$n_1$	8,0
Сила пружини за попередньої деформації, Н	$F_1$	500,0
Сила пружини за робочої деформації, Н	$F_2$	1333,0
Сила пружини за максимальної деформації, Н	$F_3$	1667,3
Робочий хід пружини, мм	$H$	5,04
Довжина пружини, мм	$L_0$	56,57
Довжина пружини за попередньої деформації, мм	$L_1$	53,55
Довжина пружини за робочої деформації, мм	$L_2$	48,51
Довжина пружини за максимальної деформації, мм	$L_3$	46,50
Максимальна дотична напруга, МПа	$\tau_{\max}$	603,56
Дотична напруга, що допускається, МПа	$[\tau]$	660,00
Модуль зсуву матеріалу, МПа	$G$	78500,0
Густина матеріалу, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	8000,0
Маса пружини, кг	-	0,145
Довжина розгорнутої пружини, мм	-	600,0
Жорсткість пружини, Н/мм	-	165,463

Якщо припустити, що бральний пас не розтягується, тоді це збільшення буде компенсуватися переміщенням натяжного ролика на величину  $\Delta L/2$ . Відповідно, пружина натяжного механізму стиснеться на величину:

$$\Delta_{np} = \frac{\Delta L L_{np}}{2L_p}. \quad (10)$$

За значенням жорсткості пружини  $c$  знайдемо силу додаткового стиску пружини  $F_{n,\delta} = c\Delta_{np}$  та силу додаткового натягу усього паса натяжним роликом:

$$F_{n,\delta} = \frac{F_{np} L_{np}}{L_p} = c \frac{\Delta L}{2} \cdot \frac{L_{np}^2}{L_p^2}. \quad (11)$$

Тоді сила  $S_\delta$  додаткового натягу брального паса, з урахуванням  $\Delta_{np}$ , становитиме:

$$S_\delta = \frac{F_{n,\delta}}{2} = \frac{c\Delta_{np} \alpha L_{np}^2}{4L_p^2}. \quad (12)$$

Товщина шару стебел льону-довгунця, які знаходяться в бральному рівчаку, визначається за виразом  $\Delta_{uu} = v_{uu}/L$  (де  $v_{uu}$  – об'єм, який займають частини стебел, що затиснуті у бральному рівчаку). У випадку кубічного розташування стебел:  $v_{uu} = i_L d_c^2$  ( $i_L$  визначається за виразом (2)). Товщина шару стебел льону:

$$\Delta_{uu} = \frac{v_{uu}}{L} = Bi_0 d_c^2 \frac{V_m}{V_p}. \quad (13)$$

За  $B = 0,38$  м,  $i_0 = 1600$  шт/м<sup>2</sup>,  $d_c = 1,5$  мм,  $V_m = 2,01$  м/с та  $V_p = 2,35$  м/с обчислюємо товщину шару стебел  $\Delta_{ш} = 1,2$  мм, що менша за діаметр  $d_c$ . Це свідчить про те, що за таких параметрів роботи брального апарата стебла у бральному рівчаку розташовуються в один рядок і між стеблами можливі зазори, тому приймаємо  $\Delta_{ш} = d_c = 1,5$  мм.

За виразом (12), знаючи жорсткість пружини  $c = 165,5$  Н/мм обчислюємо  $S_0 = 195$  Н. Тоді сила, що необхідно прикласти вздовж брального паса для подолання опорів, які виникають при його вигинах і терті в опорах роликів, буде:  $T = 0,1 \cdot (1000 + 195) = 120$  Н. Потужність, що витрачається на подолання опорів у льонобральній секції, визначимо за виразом:  $N_{оп} = TV_p = 2,35 \cdot 120 = 282$  Вт.

Визначимо потужність, що необхідна для витягування стебел льону з ґрунту бральною секцією. Урахуємо, що під час брання стебел льону задіяна потужність брального диска і тягова потужність машини. Робота брання не залежить від розташування стебел льону в елементарному пучку та рівна 0,166 Дж. У випадку, коли показник швидкісного режиму брального апарата  $\mu = V_m / V_p = 0,85$ , то під час брання стебел льону половина потужності припадає на тягову потужність переміщення льонозбиральної машини, а половина – на потужність брального апарата. Тобто робота, яка затрачається на витягування одного стебла льону-довгунця з ґрунту бральною секцією, рівна  $A_{pc} = 0,083$  Дж.

Потужність, яка необхідна для брання стебел льону бральною секцією, визначається за виразом (Хайлис, 2011):

$$N_{\delta p} = A_{pc} B i_0 V_m. \quad (14)$$

Після підставлення числових значень у вираз (14), отримаємо  $N_{\delta p} = 101,4$  Вт.

Визначимо потужність, що необхідна для транспортування стебел льону бральним рівчаком. Припускаючи, що центр ваги стебла льону, яке транспортується, знаходиться посередині брального рівчака, то потужність на транспортування стебла можна обчислити за виразом:

$$N_{mp.c} = F_{mp.c} V_p, \quad (15)$$

де  $F_{mp.c}$  – проекція сили ваги  $G_c$  стебла льону

на площину брального апарата, нахиленого до горизонту під кутом  $\beta$  ( $F_{mp.c} = G_c \sin \beta = m_c g \sin \beta$ );  $m_c$  – маса стебла льону, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Знаючи скільки стебел  $i_L$  знаходиться одночасно у бральному рівчаку, за виразом (2) визначимо потужність, що необхідна для транспортування цих стебел:

$$N_{mp} = i_L N_{mp.c} = B i_0 L V_m m_c g \sin \beta. \quad (16)$$

Після підставлення значень у вираз (16), матимемо  $N_{mp} = 3,7$  Вт.

Отже, загальна потужність, яку необхідно затратити на привод бральної секції або на привод брального диска:

$$N = N_{оп} + N_{\delta p} + N_{mp}. \quad (17)$$

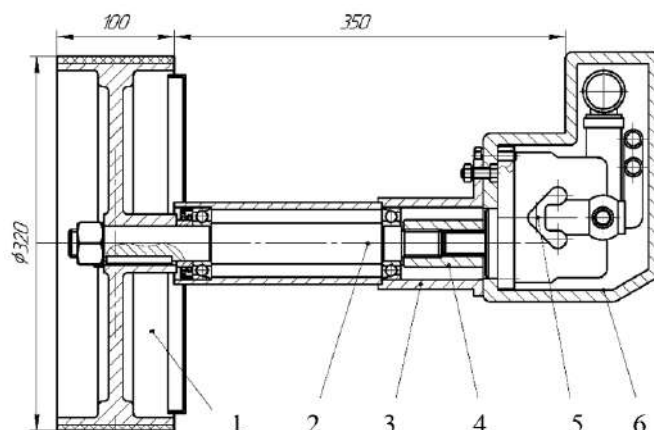
Після підставлення значень у вираз (17), отримаємо:  $N = 282 + 101,4 + 3,7 = 387 \approx 400$  Вт. Якщо конструкція брального апарата містить чотири льонобральні секції, тоді загальна потужність приводу бральних дисків складе 1,6 кВт.

Необхідна частота обертання брального диска визначається за виразом:

$$n = \frac{V_p}{2\pi R}. \quad (18)$$

Після підставлення значень у вираз (18), отримаємо:  $n = 2,33$  об/с або  $n = 140,3$  об/хв.

За відомими значеннями потужності та частоти обертання можна вибрати гідромотор для приводу бральної секції. Потужність, необхідна для приводу, обчислена для певного режиму роботи брального апарата. При виборі гідромотора потрібно враховувати можливе перевантаження льонобрального апарата. Для приводу вибираємо гідравлічний мотор-насос шестеренчастий МНШ-6-Е-3 (Федорець та ін., 1995). За габаритними розмірами мотор-насоса розроблено ескіз креслення приводу брального диска (рис. 3). Бральний диск закріплено на валу, що встановлено в консольно закріпленій на корпусі картера трубі. Через шліцьову муфту вал з'єднано із валом гідромотора. Гідромотор закріплено в корпусі картера. Відстань між бральним диском та картером складає 0,35 м.



**Рис. 3** – Конструкція привода браального диска:

1 – браальних пас; 2 – вал; 3 – труба кронштейн; 4 – шліцьова муфта; 5 – гідромотор; 6 – картер

### ВИСНОВКИ

У результаті проведення розрахунків було визначено потужність, що необхідна для приводу браальної секції дисково-пасового льнообраального апарата, яка склала 400 Вт. Також вибрано пружину стискання натяжного механізму браального паса та гідромотор приводу браальної секції.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Дацюк, Л. М., Хайліс, Г. А., & Юхимчук, С. Ф. (2012). *Механізація комбайнового і роздільного способів збирання льону (Mechanization of combine and two-phase methods of flax harvesting)*. Луцьк: РВВ ЛНТУ.
- Дідух, В. Ф., Ковалишин, С. Й., Дударев, І. М., & Тараймович, І. В. (2013). *Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгуця (Technologies of cultivation, harvesting and processing of fibre flax)*. Львів: Львівський НАУ.
- Дударев, І. М. (2015). *Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону (Theoretical basis for the modernisation of flax production machinery)*. Луцьк: РВВ ЛНТУ.
- Федорець, В. О., Педченко, М. Н., Струтинський,

В. Б. та ін. (1995). *Гідроприводи та гідропневмоавтоматика (Hydraulic drives and hydro-pneumatic automation)*. Київ: Вища школа.

Хайліс, Г. А. (2011). *Теорія льнооборочних машин (The theory of flax harvesters)*. Москва: Росинформагротех.

Хайліс, Г. А., & Федорусь, Ю. В. (2009). *Механіка рослинних матеріалів (Mechanics of plant materials)*. Луцьк: РВВ ЛНТУ.

Юхимчук, С.М., Толстушко, М.М., & Юхимчук, С.Ф. (2022a). Кінематика дисково-пасового льнообраального апарата (*Kinematics of the disc-belt flax pulling device*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 81-87. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.865>

Юхимчук, С.М., Толстушко, М. М., Юхимчук, С. Ф., & Дацюк, Л. М. (2022b). Розробка конструкції дисково-пасового льнообраального апарата (*Development of the design of a disc-belt flax-pulling device*). *Наукові нотатки*, 73, 239-242. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73.35>

DEHONDT Technologies. (n.d.). *La passion le lin*. Retrieved April 10, 2023, from <http://www.dehondt-lin.com/>

Union. (n.d.). *Onze machines*. Retrieved April 10, 2023, from <https://www.unionmachines.com/nl/machines>

**INFLUENCE OF DYNAMIC IRREGULARITY OF PADDY MACHINE  
WORKTABLE OSCILLATIONS ON GRAIN MIXTURE SEPARATION**

V. Koshul'ko\*, Y. Chursinov, N. Sova

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine***ABSTRACT**

*Paddy machines are widely used to separate various bulk products, but until now there have been no engineering methods for their technological calculation and there is no consensus on the physical nature of the process. Separation of grain products and other bulk mixes usually takes place under conditions of limited movement of material particles, which have different geometric and physical and mechanical properties and also interact with each other in a random manner. This makes it difficult to model the grain mix separation process. The aim of the study is to increase the efficiency of the grain mix separation process on the paddy machine by reducing the dynamic unevenness of the worktable oscillations. After studying the scheme of forces acting on various design elements of the paddy machine, in particular the worktable, fixing and supporting wheels, as well as the bearing, differential equations were obtained for the plane-parallel movement of the working surface and for the movement of the elements of the paddy machine during braking of the table during reciprocating motion. A program for numerical integration of the equation of the table motion was developed, the implementation of which showed that the highest values of angular velocity occur at the beginning of the acceleration of the table and at the end of its braking, when the speed corresponds to the synchronous frequency of rotation. During the research, it was found that the wear of the supporting surfaces cannot exceed 0.25 mm. It was also found that during the first 480 hours of operation, the wear on each side of the support frame was 0.2 mm and for the total period – 0.96 mm on each side. Therefore, the total wear on both sides was 1.92 mm. At the stage of the first 480 hours, the work of the table was stable, but after 720 hours of operation, whipping began, which negatively affected the efficiency of the separation process. Therefore, the improvement in the design of the paddy machine, which is possible taking into account the recommendations developed, causes a known reduction in the contact forces that occur in the case of interaction between the carrier and the table, as a result of which the wear of the contact surfaces is inevitably reduced.*

**Key words:**

grain mix,  
grain separation process,  
simulation of grain separation,  
efficiency of grain separation,  
operation of grain separators

**Article history:**

Received 11.05.2023

Accepted 14.06.2023

**\*Corresponding author:**

koshulko.v.s@dsau.dp.ua

**DOI:** 10.36910/acm.vi49.1024**To cite this article:**

Koshul'ko, V., Chursinov, Y., & Sova, N. (2023). Influence of dynamic irregularity of paddy machine worktable oscillations on grain mixture separation. *Agricultural Machines*, 49, 90-98. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1024>

УДК 621.928.15

**ВПЛИВ ДИНАМІЧНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ КОЛИВАНЬ РОБОЧОГО СТОЛУ  
ПАДДІ-МАШИНИ НА СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ****В.С. Кошулько\*, Ю.О. Чурсінов, Н.А. Сова***Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна***АНОТАЦІЯ**

Падді-машини широко використовуються для сепарування різних сипких продуктів, але до теперішнього часу відсутні інженерні методи їх технологічного розрахунку та немає єдиної думки щодо фізичної суті процесу. Сепарування зернових продуктів та інших сипких сумішей, як правило, проходить в умовах обмеженого руху частинок матеріалу, які мають різні геометричні та фізико-механічні властивості, а також взаємодіють між собою випадковим чином. Це ускладнює опис процесу сепарування. Мета дослідження – підвищення ефективності сепарування зернових сумішей на падді-машині шляхом зменшення динамічної нерівномірності коливань робочого стола. Після дослідження схеми сил, які діють на різні складові падді-машини, зокрема сортувальний стіл, фіксуючі й несучі колеса, а також підшипник, були отримані диференціальні рівняння для плоско-паралельного руху робочої поверхні та для руху елементів падді-машини упродовж гальмування столу під час зворотно-поступального руху. Розроблено програму чисельного інтегрування рівняння руху стола, реалізація якої показала, що найбільші значення кутової швидкості виникають на початку розбігу стола та в кінці його гальмування, коли швидкість відповідає синхронній частоті обертання. Під час дослідження було встановлено, що зношування опорних поверхонь не може перевищувати 0,25 мм. Також було встановлено, що за перші 480 год роботи зношування складо 0,2 мм з кожного боку опорної рами, а за весь проміжок – 0,96 мм з кожного боку. Отже, загальне зношування обох боків становило 1,92 мм. На етапі перших 480 год робота стола була стійкою, однак за напрацювання 720 год почалися прояви биття, що негативно впливає на ефективність процесу сепарування. Отже, удосконалення конструкції падді-машини спричиняє значне зменшення зношення контактних поверхонь.

**Ключові слова:**

зернова суміш,  
сепарування зерна,  
моделювання сепарування  
зерна,  
ефективність сепарування зерна,  
експлуатація зернових  
сепараторів

**Історія публікації:**

Отримано 11.05.2023

Затверджено 14.06.2023

**\*Автор для листування:**

koshulko.v.s@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1024

**Цитувати цю статтю:**

Кошулько, В. С., Чурсінов, Ю. О., & Сова, Н. А. (2023). Вплив динамічної нерівномірності коливань робочого столу падді-машини на сепарування зернових сумішей. *Сільськогосподарські машини*, 49, 90-98. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1024>



## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сепарування зернових продуктів та інших сипких сумішей, як правило, проходить в умовах обмеженого руху частинок матеріалу, які мають різні геометричні та фізико-механічні властивості, а також взаємодіють між собою випадковим чином (Алієв, 2019).

Властивості зернової маси та якість сепарування зерна – це основні параметри, що використовуються в технології перероблення зерна та характеризують випадковий розподіл складових зернової суміші та перебіг процесу сепарування (Шевченко та ін., 2019). Ці характеристики ускладнюють детермінований (динамічний) опис процесу сепарування та застосування методів обчислення показників якості процесу, які ґрунтуються на динамічних моделях цього процесу (Тищенко, 2004).

Робочі органи вібраційних сепараторів (Шевченко & Алієв, 2021) та падді-машин (Кошулько та ін., 2012) мають канали з гладким днищем та зигзагоподібними стінками, які складаються з трикутних призм із перемичками. Канали мають невеликий нахил в напрямку основи призми і здійснюють прямолінійні коливання в горизонтальній площині (рис. 1), що перпендикулярна їхній поздовжній осі. За такого руху частинки зернової маси відштовхуються по черзі від правої та лівої стінки, що спричиняє їх самосортування та розшарування суміші. Нелущене зерно, що розташоване у верхніх шарах суміші, рухається вгору каналу, а лущене – виходять з каналу, рухаючись вниз.

На частинку продукту, що потрапила до каналу, діють: сили інерції, які виникають при

ударі частинок по бокових стінках каналу; сила ваги частинки; сили тертя між стінками, днищем та частинкою. Сили співудару частинок по бокових стінках спрямовані перпендикулярно боковим стінкам елементу і спрямовують частинку вгору, оскільки одна із складових сил спрямована вгору, а інша – паралельно основі. Сила ваги спричиняє рух частинки вниз (Алієв та ін., 2019; Шевченко та ін., 2021; Возняк та ін., 2021).

За певних значень кута нахилу, частоти та амплітуди коливань, сили, що діють на частинку матеріалу, будуть збалансовані, що дозволить частинці здійснювати гармонічні коливання в певному місці каналу, де відстань між стінками становить  $L_{кр.}$  (рис. 1, б). Ця відстань називається критичною координатою. Однак, в реальних умовах такий режим руху частинки є нестійким, і будь-яке збурення виведе частинку з цього режиму. Якщо частинка матеріалу випадково потрапить вище критичної координати, то сила ударів в цій зоні зросте і частинка буде переміщуватися вгору. З іншого боку, якщо частинка опиниться нижче критичної координати, то вона буде переміщуватися вниз. Критична координата залежить не лише від параметрів каналу, налаштувань та кінематичних параметрів машини, але й від ударно-фрикційних властивостей частинки матеріалу. Що більш пружна частинка, то менше значення  $L_{кр.}$ , тобто тим нижче вона буде розташована. Якщо більш пружну частинку помістити між критичними координатами, то вона буде переміщуватися вгору. З іншого боку, менш пружна частинка переміщується вниз (Кошулько & Тимчак, 2022).

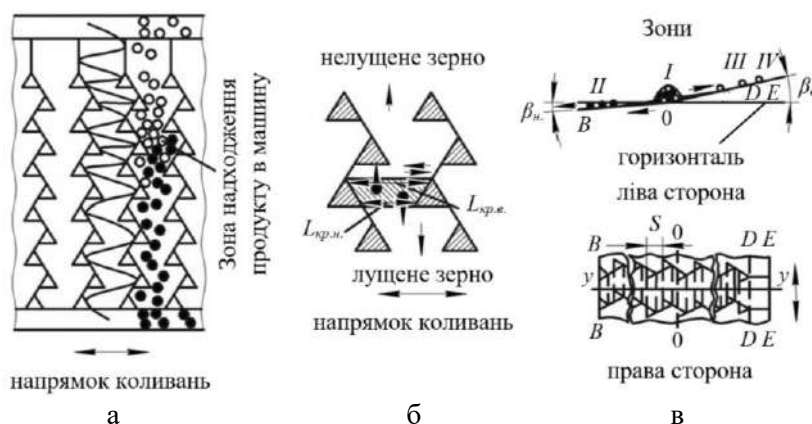


Рис. 1 – Сортиувальний стіл падді-машини (Кошулько та ін., 2012):

а – схема розташування каналів; б – розташування елементу каналу;

в – січення робочого каналу (I – зона сепарування; II, III, IV – зони виходу фракцій матеріалу)

Висота трапеції повинна бути меншою за різницю критичних відстаней аби забезпечити достатньо високу ефективність відокремлення необхідної фракції. За послідовного з'єднання кількох елементів в каналі збільшується ймовірність спрямованого руху частинок матеріалу з різними властивостями, що може підвищити ефективність відокремлення необхідної фракції. Якщо більш пружні частинки (нелущене зерно) розташовані у верхньому шарі суміші, це може сприяти високій ефективності відокремлення. Однак фізичні властивості частинок матеріалу та їх суміші значно відрізняються, що ускладнює процес відокремлення, оскільки варіаційні криві цих властивостей значно перекривають одна другу (Козаченко та ін., 2021).

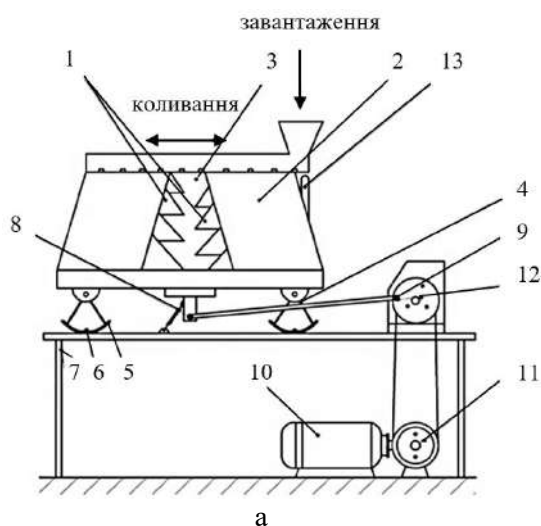
Падді-машини широко використовуються для сепарування різних сипких продуктів, але до теперішнього часу відсутні інженерні методи їх технологічного розрахунку та не існує єдиної думки щодо фізичної суті процесу, що має місце у відомих конструкціях падді-машин.

**Мета дослідження** – підвищення ефективності сепарування зернових сумішей на робочому столі падді-машині шляхом зменшення динамічної нерівномірності його коливань.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження впливу на процес сепарування зернових сумішей динамічної нерівномірності коливань робочого стола падді-машини проводилися в два етапи: теоретичний та експериментальний. Як відомо, робота падді-машини завжди супроводжується зношуванням контактних поверхонь столу та фіксуєючих коліс. Одним із недоліків падді-машин є інтенсивне зношування контактних поверхонь столу та підшипника водила під час її роботи і, як наслідок, необхідність досить часто проводити відновлення контактуючих поверхонь враховуючи, що сила тертя, яка є причиною зношування, залежить від навантаження. Першим етапом (теоретичним) було визначення причин, що спричиняють зношування, та шляхів уникання чи суттєвого зменшення зношування поверхонь столу та фіксуєючих коліс. Теоретичні дослідження виконані із використанням класичних методів теоретичної механіки.

Другим етапом було дослідження процесу віброударного сепарування зернових сумішей на експериментальній падді-машині, схема якої подана на **рис. 2**. Дослідження проводили на суміші вівса, яка містила лущене та нелущене зерно вологістю 12,5–14,0%. Вміст смітних домішок (вівсюга) становив до 5%, а пилу – 0,23%.



**Рис. 2** – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальних вигляд (б) експериментальної падді-машини:

1 – похилий стіл; 2 – стінки; 3 – зигзагоподібний канал; 4 – стійка; 5 – сегментно-подібний елемент; 6 – стопорний болт; 7 – станина; 8 – кронштейн; 9 – кривошипно-шатунний механізм; 10 – клинопосова передача; 11 – редуктор; 12 – болт; 13 – пристосування для регулювання амплітуди зворотньо-поступального руху

Методика експериментальних досліджень передбачала завантаження вівса після лушення в робочий елемент сортувального столу, де проводилося сепарування суміші. Перед сепаруванням вміст нелущеного вівса у зерновій масі становив 25%. Також методика проведення експерименту передбачала оцінювання результатів сепарування, що проходило шляхом відбирання проб зерна масою 500 г з подальшим їх розбиранням на лущене та нелущене зерно. У такій спосіб визначали вміст нелущеного зерна в лущеному після сепарування та вміст лущеного зерна в нелущеному. Результати фіксувалися та обчислювалися у відсотках.

Розроблено спеціальний лоток для визначення продуктивності каналу, в який засипалося лущене зерно упродовж хвилини. Під час експерименту змінювався кут нахилу сортувального столу машини, який визначався кутоміром, а положення сортувального столу фіксувалося болтом та гайкою, зажатим в пазу кутоміра. Частота коливань сортувального столу регулювалася за допомогою редуктора та клинопасової передачі. Амплітуда коливань налаштовувалася шляхом зміни довжини тяги кривошипно-шатунного механізму. Частота коливань сортувального столу регулювалася за допомогою частотного перетворювача. Відстань між стінками робочого каналу налаштовувалася шляхом пересування однієї із стінок каналу. Ступінь завантаження сировини (продуктивність) регулювали за допомогою щільного дозатора живильного пристрою.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розглянемо рух колеса протягом одного робочого циклу столу машини (рис. 3). На етапі прискореного руху столу під натиском водила внаслідок моментної дії сили  $S_n$  стіл буде притискатися до однієї пари фіксуєчих коліс в точках  $A$  та  $B$ . Силами зчеплення  $S_A$  та  $S_B$  фіксуєчі колеса будуть розкручуватися до максимальної швидкості, при цьому кут  $\varphi$ , що визначає положення водила змінюється від 0 до  $\pi/2$ .

На етапі гальмування стіл, стримуючись водилом, буде притискатися до другої пари фіксуєчих коліс, а сили взаємодії в точках  $A$  та  $B$  зникнуть, що дозволяє колесам, які вийшли із зачеплення зберігати максимальну кутову швидкість до повної зупинки столу в

крайньому положенні, для якого кут  $\varphi = \pi$ . Зростання кута  $\varphi$  спричиняє зачеплення коліс в точках  $A$  та  $B$ .

Стіл при  $\varphi \geq \pi$  починає розганятися від нульової швидкості, водночас фіксуєчі колеса мають швидкість близьку до максимальної, а це спричиняє зношування. Для уникнення зношування необхідно забезпечити умови, за яких фіксуєчі колеса не будуть виходити із зачеплення на етапі гальмування.

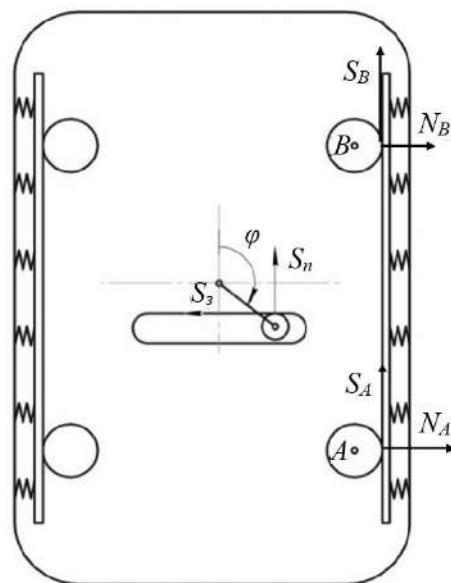


Рис. 3 – Схема конструкції столу, який унеможливує проковзування фіксуєчих коліс

Сила зчеплення, яка обертає фіксуєче колесо  $S_A$ :

$$S_A = \frac{I_\phi \ddot{\varphi}}{r_\phi} + \frac{N_A \delta}{r_\phi}, \quad (1)$$

де  $r_\phi$  – радіус фіксуєчого колеса;  $I_\phi = m_\phi r_\phi^2 / 2$  – осьовий момент інерції колеса під час кочення без ковзання;  $N_A$  – сили нормальної взаємодії;  $\delta$  – коефіцієнт тертя-кочення фіксуєчого колеса по контактній поверхні столу.

Нормальну роботу фіксуєчого колеса можна гарантувати у випадку, якщо сила зчеплення не буде перевищувати кулонового тертя, яке може виникати під час проковзування. Ця сила в точці  $A$  визначається за виразом:

$$F_T = f N_A. \quad (2)$$

Проковзування не відбудеться, якщо буде виконуватися нерівність:

$$fN_A > \frac{I\ddot{\varphi}}{r_\phi} + \frac{N_A\delta}{r_\phi}. \quad (3)$$

Тобто умова кочення без ковзання буде мати вигляд:

$$\left(f - \frac{\delta}{r_\phi}\right)N_A > \frac{I\ddot{\varphi}}{r_\phi} \quad (4)$$

або

$$N_A \geq \frac{I\ddot{\varphi}}{r_\phi f - \delta}. \quad (5)$$

Ураховуючи, що  $r_\phi\ddot{\varphi} = \ddot{x}$  та  $I = m_\phi r_\phi / 2$ , тоді нерівність (5) можна записати:

$$N_A \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{m_\phi \ddot{x}}{f - \frac{\delta}{r_\phi}}. \quad (6)$$

Очевидно, що умова (6) виконується не завжди. Зокрема, умова не буде виконуватися на етапі взаємодії колеса і стола, якщо  $N_A = 0$ , тобто на етапі гальмування столу. Для забезпечення умови необхідно конструктивно надати початковий натяг  $N_0$ , притискуючи контактну поверхню столу до фіксуєчих коліс стисненими пружинами, як показано на **рис. 3**. Пружини вибираються з урахуванням рівності:

$$C\Delta = N_0, \quad (7)$$

де  $\Delta$  – деформація пружин;  $C$  – сумарний коефіцієнт жорсткості пружин.

Початковий натяг  $N_0$  визначається за рівнянням:

$$N_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_\phi r_\phi \ddot{x}_{\max}}{r_\phi f - \delta}, \quad (8)$$

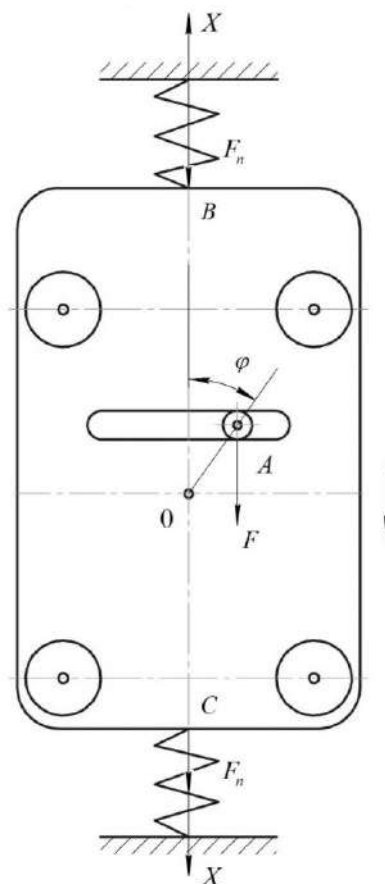
де  $\ddot{x}_{\max}$  – максимальне прискорення.

Початковий натяг буде забезпечувати безперервне притискання колеса до контактної поверхні столу, за якого проковзування колеса унеможливиться.

Як конструктивне рішення для зменшення сили взаємодії підшипника зі столом пропонується використання пружинних буферів, що встановлені в площині руху, як показано на **рис. 4**. Очевидно, що за відсутності кривошипа  $OA$  вібраційний стіл може здійснювати гармонічні коливання в напрямку осі  $OX$ . Встановимо вплив пружин в точках  $B$  та  $C$  на силу взаємодії підшипника з контактними поверхнями столу під час роботи машини. Припустимо, що фіксуєчі колеса забезпечують прямолінійний рух столу. Нехтуючи тертям-коченням колес, рівняння періодичного руху столу матиме вигляд:

$$m\ddot{x} = F + 2F_n, \quad (9)$$

де  $m$  – маса столу;  $F$  – сила, з якою підшипник тисне на стіл;  $F_n$  – сила пружності, яка за відомого коефіцієнта жорсткості двох пружин  $C$  визначається як  $2F_n = -cx$  або  $F_n = -cx/2$ .



**Рис. 4** – Схема сортувального столу зі встановленими пружинними буферами

У результаті перетворень рівняння (9) можна записати у вигляді:

$$\ddot{x} + k^2 x = \phi, \quad (10)$$

де  $k = (2C/m)^{0.5}$ ;  $\phi = F/m$ .

Припустимо, що привод забезпечує рух столу за рівнянням:

$$x = r \cos(\omega t), \quad (11)$$

де  $r$  – довжина (радіус) водила;  $\omega$  – частота обертання водила;  $t$  – час.

З рівняння (10) отримаємо:

$$F = mr[(k^2 - \omega^2) \cos(\omega t) - \varepsilon \sin(\omega t)]. \quad (12)$$

де  $\varepsilon$  – кутове прискорення.

Сила взаємодії водила та стола  $F$  за наявності буферів, для яких параметр  $k$  має значення менше за кутову швидкість  $\omega$ , зменшується за будь-якого  $k$ . Мінімальне значення сила  $F$  буде набувати у випадку, коли  $\omega = k$ .

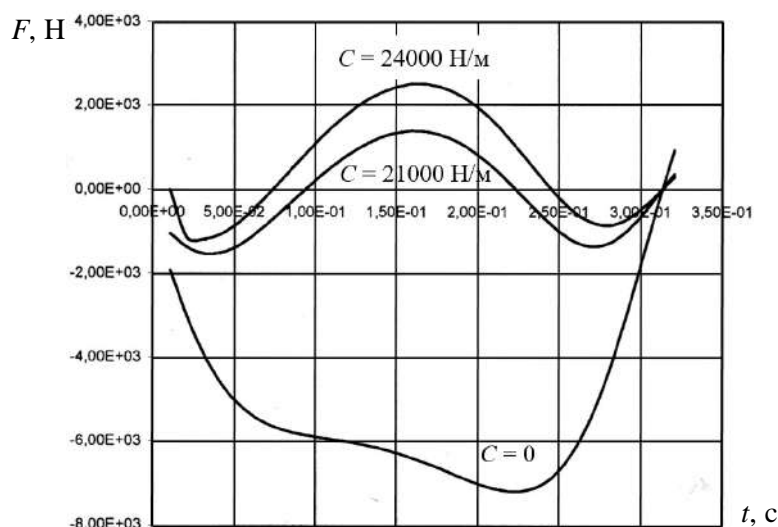
На **рис. 5** подані графіки зміни сили взаємодії водила і стола за один робочий цикл коливання столу для різних коефіцієнтів жорсткості буферів  $C$ . Під час побудови графіків необхідні розрахунки проводилися для машини МСХ-М, привод якої здійснюється двигуном АІР-100L6. Початкові дані для обчислень: маса стола  $m = 480$  кг; радіус водила  $r = 0,19$  м; кутова швидкість  $\omega$  та кутове прискорення  $\varepsilon$  визначалися за результатами інтегрування диференціального

рівняння руху стола. Аналіз зміни контактної тиску залежно від часу (**рис. 5**) показує, що тиск залежить від сумарного коефіцієнта жорсткості буферів. Варіюванням коефіцієнта  $C$  виявлено, що мінімальні сили взаємодії підшипника та стола виникають за значення коефіцієнта  $C = 21000$  Н/м, тобто коефіцієнт жорсткості кожного буфера має дорівнювати 10500 Н/м.

Отже, удосконалення конструкції падді-машини, яке можливе із урахуванням напрацьованих рекомендацій, спричиняє знане зменшення ( $\approx 3$  рази) контактних зусиль, що виникають у випадку взаємодії водила та стола, внаслідок чого зношення контактних поверхонь неминуче зменшується.

Під час експериментальних досліджень ставилося за мету – вивчення характеру зношування поверхні, якою рухаються фіксуючі колеса. Це було реалізовано шляхом моделювання зношування опорної поверхні рами за допомогою стиску пластин товщиною 0,1 мм, які були закріплені на рамній конструкції. З кожного боку рами, під кожним з чотирьох коліс, була можливість збільшувати зазор, що моделює зношування, до 1 мм.

Для налаштування установки на стабільний режим роботи опорні колеса та опорна рама, якою відбувалося переміщення робочого каналу, були відрегульовані. Коливання проводилися з встановленою частотою та амплітудою у визначеному режимі. Характер розподілу зерна під час сепарування та у зигзагоподібних стінках, а також за шириною каналу за вибраних параметрів був стабільним.



**Рис. 5** – Залежність величини тиску  $F$  підшипника на стіл від часу  $t$  та жорсткості  $C$  буфера

За зменшення зазору на опорних поверхнях кожного з чотирьох коліс на 0,1 мм режим роботи системи залишався стійким і характер переміщень робочого стола майже не змінювався. Збільшення зазору до 0,2 мм викликало нестійкість в роботі системи та за зворотно-поступальних рухів робочого столу з'явився додатковий шум, але ефективність сепарування зернової маси в робочому каналі не знижувалася. Зі збільшенням зазору до 0,3 мм спостерігалось зниження ефективності сепарування вівса та з'явилися додаткові коливання, які вказували на нерівномірну роботу робочого каналу стола. На **рис. 6** показано зношування та наклеп на опорних поверхнях фіксуючих та опорних коліс, що демонструє процес їх зношування.

Зношування вказує на нерівномірне розподілення навантаження під час роботи. За

результатами експерименту встановлено, що зниження ефективності сепарування має місце у випадку зношування опорних поверхонь на величину 0,25 мм (**рис. 7**). За подальшого збільшенні зношення опорних поверхонь ефективність процесу сепарування значно погіршується.

Також становить серйозну проблему погіршення експлуатаційних характеристик установки, зокрема збільшення шуму, биття рами та робочого столу, проковзування коліс і, головне, – порушення рівномірного та ефективного перебігу процесу сепарування суміші вівса на лущені та нелущені зерна. Отже, можна зробити висновок, що зношування опорних поверхонь робочого стола не повинно перевищувати 0,25 мм, щоб зберегти оптимальну ефективність та стабільність процесу сепарування.

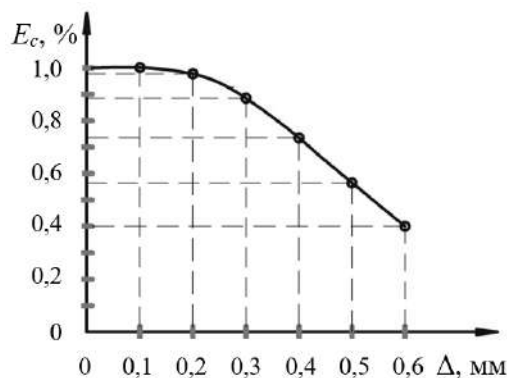


а



б

**Рис. 6** – Зовнішній вигляд ролика до (а) та після (б) експерименту



**Рис. 7** – Вплив ступеня  $\Delta$  зношування опорної поверхні на ефективність процесу сепарування зерна  $E_c$



## ВИСНОВКИ

Після дослідження схеми сил, які діють на різні складові падді-машини (сортувальний стіл, фіксуючі та несучі колеса, а також підшипник), були отримані диференціальні рівняння для плоско-паралельного руху робочої поверхні машини та для руху елементів падді-машини під час гальмування столу під час зворотно-поступального руху. Розроблено програму чисельного інтегрування рівняння руху стола, реалізація якої показала, що найбільші значення кутової швидкості виникають на початку розбігу стола та в кінці його гальмування, коли швидкість відповідає синхронній частоті обертання. Під час проведеного дослідження було встановлено, що зношування опорних поверхонь не може перевищувати 0,25 мм.

Також було встановлено, що упродовж 480 год роботи зношування склало 0,2 мм з кожного боку опорної рами, а за весь проміжок – 0,96 мм з кожного боку. Отже, загальне зношування обох боків становило 1,92 мм. На етапі перших 480 год робота стола була стійкою, однак за напрацювання 720 год почалися прояви биття, що негативно впливає на ефективність процесу сепарування.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Aliiev, E., Gavrilenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*, 50, 12-22. <https://doi.org/10.2298/APT1950012A>
- Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., & Kaminski, J. R. (2021). Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibro-pneumatic separators. *Mechanika*, 27(4), 311-320. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.27647>
- Алієв, Е. Б. (2019). *Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику (Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material)*. Запоріжжя: СТАТУС.
- Возняк, О. М., Штуць, А. А., & Колісник, М. А. (2021). Дослідження параметрів лінійного асинхронного електроприводу віброцентробіжного сепаратора зерна (*Justification of parameters and development of a linear asynchronous electric drive of a vibrocenter grain separator*). *Вісник Хмельницького національного університету*, 5(301), 99-108. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-301-5-99-108>
- Козаченко, О. В., Алієв, Е. Б., Бакум, М. В., Михайлов, А. Д., & Крекот, М. М. (2021). Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насіннєвого матеріалу гірчиці (*Justification of the efficiency of using a vibrofriction separator in the preparation of mustard seed material*). *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 31, 142-151. <https://doi.org/10.36710/ioc-2021-31-13>
- Кошулько, В. С., Науменко, М. М., Чурсінов, Ю. О., & Міщенко, М. І. (2012). Патент України 70722. *Круповідокремлююча машина (падді-машина) (Grain-separating machine (paddy machine))*. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
- Кошулько, В. С., & Тимчак, Д. О. (2022). Наукове обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання для сепарування продуктів лущення зерна вівса віброударним методом (*Scientific substantiation of the structural and technological parameters of the equipment for separating oat grain husking products using the vibro-impact method*). В: *Землеробська механіка. Інноваційні технології харчових виробництв*. Т. 4. Інноваційні технології харчових виробництв (с. 312-374.). Дніпро: Свідлер А. Л.
- Тищенко, Л. Н. (2004). *Інтенсифікація сепарування зерна (Intensification of grain separation)*. Харьков: Основа.
- Шевченко, І. А., & Алієв, Е. Б. (2021). Патент України 122809. *Адаптивний вібропневматичний сепаратор (Adaptive vibropneumatic separator)*. Київ: ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
- Шевченко, І., Алієв, Е., & Камінський, Я. Р. (2019). Результати експериментальних досліджень процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшника за об'ємною вагою (*Results of experimental studies of the process of precision separation of sunflower seed by volume weight*). *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, 24(38), 252-259. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-26](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-26)

APPLICATION OF ALLOYING MATERIALS AND ABSORBING COATINGS  
IN LASER STRENGTHENING OF ROAD TRANSPORT DETAILS

Y. Kovalchuk\*, O. Pushka, A. Voitik

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine



## ABSTRACT

*The method of surface laser treatment can be used to strengthen the parts of motor vehicles used in the agro-industrial complex. In this method, the strength and wear resistance of metal car parts also depend on the use of various absorbing coatings and alloying elements. Absorbing coatings allow the processed steel sample to receive a much larger part of the energy of laser radiation, while significantly reducing the reflection of the beam from the surface of the part being strengthened. As a result of the study of the effect of absorbing coatings on the depth of laser treatment of steel 45, it was determined that the best results were obtained in the case of using coatings containing carbon black in the form of aerosols, as well as aluminum and zinc oxides, which provides a significant increase in the depth of the laser exposure zone. Effective use of absorbing coatings will significantly increase laser efficiency, allowing the use of a laser of lower power and contributing to a reduction in the cost of reinforcing automotive parts. In order to achieve high wear resistance of the surface layers of parts, it is advisable to apply surface alloying with the use of special absorbing coatings during their processing with a laser beam. Thanks to laser microalloying of surface layers with chemical elements and compounds, the strengthening efficiency of various iron-carbon alloys is achieved. Carbide, oxide, boride phases of components of absorbent coatings have the highest wear resistance. The study of laser hardening of 40X steel allows us to draw conclusions that in order to obtain wear-resistant layers on the surface of the corresponding parts, it is necessary to apply an absorbent coating and apply surface alloying. At the same time, layers doped with boride, carbide, nitride, and oxide phases have the highest wear resistance. For specific steel parts, the choice of laser hardening mode depends on many factors. Continuous lasers are the most promising.*

**Key words:**

road transport,  
laser hardening,  
laser exposure zone,  
alloying materials,  
absorbent coatings

**Article history:**

Received 14.05.2023

Accepted 17.06.2023

**\*Corresponding author:**

temp14053@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1026

**To cite this article:**

Kovalchuk, Y., Pushka, O., & Voitik, A. (2023). Application of alloying materials and absorbing coatings in laser strengthening of road transport details. *Agricultural Machines*, 49, 99-104. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026>

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

**ЗАСТОСУВАННЯ ЛЕГУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОГЛИНАЮЧИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗМІЦНЕННІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ****Ю.О. Ковальчук\*, О.С. Пушка, А.В. Войтік***Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна***АНОТАЦІЯ**

Для зміцнення деталей автомобільного транспорту, що використовується в агропромисловому комплексі, може застосовуватися метод поверхневого лазерного оброблення. У випадку використання цього методу міцність та зносостійкість металевих деталей автомобілів залежать від застосування різних поглинаючих покриттів та легуючих елементів. Поглинаючі покриття дозволяють зразку зі сталі, що оброблюється, отримувати більшу частину енергії лазерного випромінювання внаслідок зменшення відбиття променя від поверхні деталі, яка зміцнюється. У результаті дослідження впливу поглинаючих покриттів на глибину лазерного оброблення сталі 45 визначено, що найкращі результати отримано для випадку використання покриттів, які містять сажу у вигляді аерозолі, а також оксиди алюмінію та цинку, що забезпечують збільшення глибини зони лазерного впливу. У випадку ефективного застосування поглинаючих покриттів відбудеться підвищення коефіцієнта корисної дії лазера, що дозволить застосовувати лазер меншої потужності та сприятиме зниженню собівартості зміцнення деталей автомобільного транспорту. Для досягнення високої зносостійкості поверхневих шарів деталей доцільно під час їхнього оброблення лазерним променем застосовувати поверхнєве легування з використанням спеціальних поглинаючих покриттів. Завдяки лазерному мікролегуванню поверхневих шарів хімічними елементами та сполуками досягається підвищення ефективності зміцнення різних залізовуглецевих сплавів. Карбідні, оксидні, боридні фази складових поглинаючих покриттів мають найбільш високу зносостійкість. Дослідження лазерного зміцнення сталі 40Х дозволяє зробити висновки, що для отримання зносостійких шарів на поверхні деталей необхідно наносити поглинаюче покриття і застосовувати поверхнєве легування.

**Ключові слова:**

автомобільний транспорт,  
лазерне зміцнення,  
зона лазерного впливу,  
легуючі матеріали,  
поглинаючі покриття

**Історія публікації:**

Отримано 14.05.2023

Затверджено 17.06.2023

**\*Автор для листування:**

temp14053@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1026

**Цитувати цю статтю:**

Ковальчук, Ю. О., Пушка, О. С., & Войтік, А. В. (2023). Застосування легуючих матеріалів та поглинаючих покриттів при лазерному зміцненні деталей автомобільного транспорту. *Сільськогосподарські машини*, 49, 99-104. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час виготовлення або відновлення деталей автомобільного транспорту широко застосовуються лазерні технології (*Dobras & Rutkowska-Gorczyca, 2019*). Тепер актуальним завданням є покращення властивостей та збільшення ресурсу напрацювання деталей автотранспорту, що використовуються в агропромисловому комплексі. Зокрема, для зміцнення деталей може використовуватися метод поверхневого лазерного оброблення. Ефективність використання цього методу для підвищення міцності та зносостійкості металевих деталей автомобілів залежить від застосування різних поглинаючих покриттів і легуючих елементів. Поглинаючі покриття дозволяють зразку зі сталі, що оброблюється, отримувати ще більше енергії лазерного випромінювання, суттєво зменшуючи при цьому відбиття променя від поверхні деталі, що зміцнюється (*Ковальчук та ін., 2017*).

Різні поглинаючі покриття впливають на глибину поверхневого лазерного оброблення залізвуглецевих сплавів, що, в свою чергу, впливає на ресурс напрацювання деталей автомобільного транспорту. Також актуальним є дослідження технологічних особливостей лазерного зміцнення сталевих деталей шляхом мікролегування поверхні (*Казаков та ін., 2021*). Для досягнення високої зносостійкості поверхневих шарів деталей доцільно під час їхнього оброблення лазерним променем використовувати поверхневе легування із застосуванням спеціальних поглинаючих покриттів. Завдяки лазерному мікролегуванню поверхневих шарів хімічними елементами та сполуками підвищується міцність різних залізвуглецевих сплавів. Зокрема, карбідні, оксидні, боридні фази складових поглинаючих покриттів мають найвищу зносостійкість.

**Мета дослідження** – дослідити вплив різних поглинаючих покриттів та легуючих елементів на характеристики залізвуглецевих сплавів для покращення їхніх механічних властивостей, а також для збільшення ресурсу напрацювання деталей автотранспорту.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводили із використанням основних положень теорії фізики твердого тіла, теорії взаємодії концентрованих потоків

енергії з речовиною, тертя та зношування в абразивному середовищі. Особливу увагу приділено дослідженню: кінетики структури, напружено-деформованого стану поверхонь, елементного складу. Під час оброблення результатів експериментальних досліджень використані методи математичної статистики.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

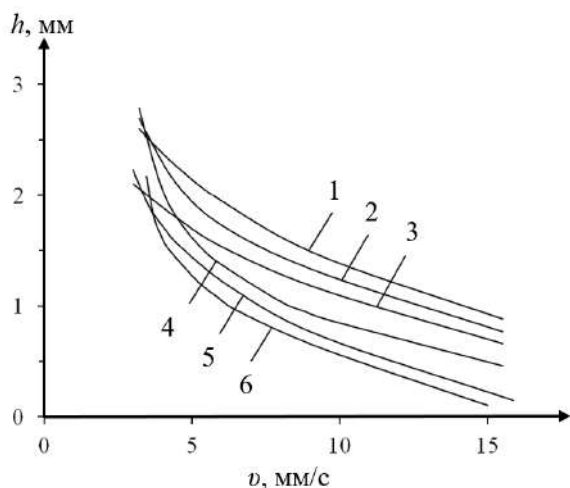
Під час лазерного оброблення деталей автотранспорту важливим фактором, що визначає їх міцність та зносостійкість, є глибина зміцненого шару, на яку впливають параметри цього процесу, зокрема поглинаючі покриття, що наносяться на відповідну поверхню зразків. У цьому випадку зразок із залізвуглецевих сплавів, що оброблюється, отримує значно більше енергії лазерного випромінювання внаслідок використання поглинаючих покриттів, що зменшують відбиття від поверхні деталі, яка зміцнюється, лазерного променя (*Григор'янц та ін., 2008*).

За результатами експериментального дослідження, яке проведене на полірованому зразку зі сталі 45, визначено як змінюється глибина зони лазерного впливу залежно від поглинаючих покриттів (**рис. 1**). Очевидно, що швидкість лазерного оброблення деталей суттєво впливає на ефективність використання поглинаючих покриттів. Вона визначає час впливу лазерного випромінювання та температуру поверхні зразка. Оплавлення поверхні зразка, який зміцнюється, не відбувається у випадку збільшення швидкості лазерного впливу понад 6 мм/с. Значне збільшення глибини зони лазерного впливу має місце внаслідок використання покриттів, що містять сажу у вигляді аерозолу та оксиди алюмінію й цинку (на **рис. 1** – криві 1–4).

У випадку ефективного використання поглинаючих покриттів значно зросте поглинання енергії лазерного випромінювання, збільшиться коефіцієнт корисної дії лазера, що дозволить для оброблення деталей на потрібну глибину використовувати лазерну установку меншої потужності. Звичайно, всі можливі випадки лазерного зміцнення сталі 45 за застосування різних поглинаючих покриттів результати дослідження не охоплюють.

Не можна вважати розв'язаною проблему розроблення більш дешевих, ефективних та високотехнологічних покриттів для лазерного

поверхневого оброблення залізовуглецевих сплавів, тому існує необхідність продовжувати дослідження в цьому напрямі. Також доцільно для досягнення високої зносостійкості поверхневих шарів деталей автомобільного транспорту під час їхнього оброблення лазерним променем застосовувати поверхневе легування, яке може використовуватися разом із поглинаючими покриттями.



**Рис. 1** – Зміна глибини зони лазерного впливу на полірованій сталі 45 під час дослідження різних поглинаючих покриттів ( $E \cong 20 \text{ МВт/м}^2$ ) (Григор'яни та ін., 2008):

- 1 – аерозольна сажа; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з органічним сполучником; 3 – водяний розчин  $\text{ZnO}$ ;
- 4 –  $\text{ZnO}$  з органічним сполучником;
- 5 – водяний розчин сажі; 6 – розчин графіту в ацетоні

У процесі мікролегування помітні дві зони: зона легування та зона термічного впливу (ЗТВ). Саме в першу зону, що у вигляді розплаву, подається легуюча речовина. При цьому відбувається нагрівання другої зони без її оплавлення. Зона термічного впливу спостерігається за периметром зони легування. Встановлено, що найбільшу твердість ЗТВ матиме лише після перетворення мартенситу в процесі лазерного легування. Однак, за легування певної площі поверхні зразків відбувається відпуск ЗТВ до твердості початкового матеріалу, тобто під легованим шаром розташовується практично незміцнена основа.

Найбільший вплив на процес та якість обробленої поверхні зразка чинить швидкість

переміщення променя лазера або зразка, потужність лазерного випромінювання, а також товщина покриття під час лазерного легування.

Кількість елементів мікролегування, що відносяться до одиниці об'єму оплавленого металу, значно впливає на структуру зони легування. Вміст легуючих елементів у зоні лазерного впливу має тенденцію до зростання зі зростанням швидкості переміщення променя лазера або зразка та зменшення потужності випромінювання.

Збільшення вмісту легуючих елементів у зоні лазерного впливу відбувається за збільшення шару поглинаючого покриття до деякої межі. Із підвищенням концентрації графіту в зоні оплавлення під час проведення цементації сталі відбувається зміна зони лазерного легування. У поверхневих шарах спостерігається структура білого чавуну, який отримано з рідкої фази. До структурних складових зміцненого шару входять мартенсит та залишковий аустеніт. Після лазерного борування зміцнена зона складається з фериту та боридів  $\text{Fe}_2\text{B}$  й  $\text{FeB}$ . Зі збільшенням кількості бору у легованій зоні вміст фериту зменшується, а вміст боридів – збільшується. Особливістю цієї зони є те, що металографічно ці фази невиразні, а також відсутня характерна для дифузійних боридних шарів голчастість. Легована зона має зернисту структуру. При цьому можливо збільшити концентрацію легуючої речовини в зоні легування з метою отримання нових фаз. Із паст на основі графіту після лазерної цементації були отримані зони, що містять цементит і включення структурно-вільного графіту. Після лазерного борування фази склалися із бориду заліза ( $\text{FeB}$ ) та фази на основі бору.

Результати мікрорентгеноспектрального, металографічного та рентгеноструктурного аналізу показали, що основою цієї фази є одна з модифікацій бору (Казаков та ін., 2021). Отримання легованих зон, які містять структурно-вільний графіт, що виконує роль твердого мастила, а також високотвердих сполук на основі бору та інших металів, має сприяти збільшенню зносостійкості робочих шарів. Формуються фази, що мають особливу будову, зумовлюють особливості структурних перетворень у зонах лазерного легування. Задані властивості поверхонь можна отримати завдяки відведенню теплоти від розплаву в

певному напрямку під час кристалізації. Після лазерної цементації спостерігається текстура цементитних пластин, які розташовані перпендикулярно до напрямку відведення теплоти. Текстура лазерних боридних зон відрізняється від текстури боридних покриттів, що отримані за твердофазної дифузії.

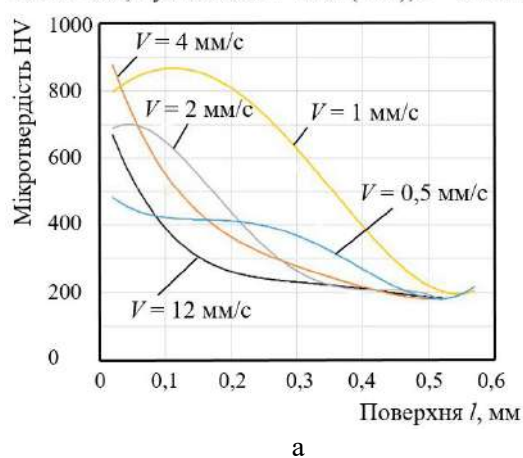
Внаслідок дії лазерного променя поверхня зразків нагрівається та відбувається утворення доріжок, що мають різну товщину, і, як наслідок, утворюються шари з різними характеристиками. За насичення поверхні розплаву бором товщина лазерних доріжок становить 90–140 мкм. Масштабний фактор, що характеризує співвідношення маси, форми зразка, режиму та площі оброблення, визначає ступінь впливу температури поверхні на процес лазерного легування. Це доводить необхідність оптимізації режимів лазерного легування деталей для отримання необхідної властивості поверхні конкретної марки сталі.

Існує необхідність у дослідженнях не тільки розподілу мікротвердості у шарах металу після лазерного легування, а й зносостійкості за різних режимів, крихкості металу. Опір зношуванню лазерних боридних шарів на порядок вищий, ніж у цементованих лазерних шарів. Крихкість лазерних боридних шарів за різних режимів оброблення нижча крихкості дифузійних боридних шарів. Отже, лазерне борування необхідно використовувати для деталей, що зазнають зношування, з великими питомими навантаженнями та ударами.

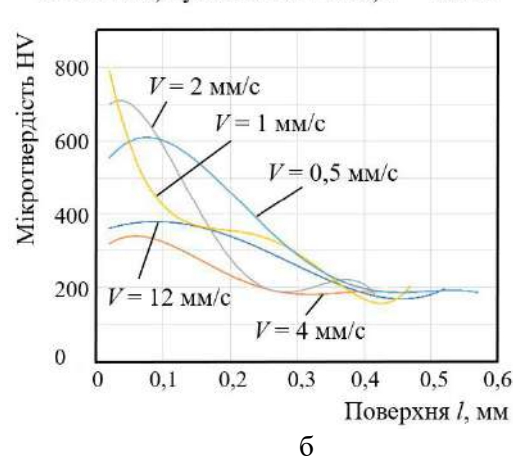
Для легування поверхні деталі можуть застосовуватися лазери імпульсної та безперервної дії, проте для промислового застосування найбільш перспективні лазерні установки безперервної дії, які мають більш високу продуктивність. Ці відмінності зумовлюють особливості утворення структури та властивостей легованих зон, що отримані із використанням лазерів безперервної дії.

Завдяки лазерному мікролегуванню поверхневих шарів хімічними елементами та сполуками досягають ефекту зміцнення різних матеріалів. Карбідні, оксидні, боридні фази у складі поглинаючих покриттів мають найбільш високу зносостійкість. Однак, при виборі режиму лазерного легування необхідно враховувати фактори: стан поверхні, що оброблюється; мікроструктура металу та його склад; температурний фактор. Найбільш перспективними для цієї мети є лазери безперервної дії. Підвищення мікротвердості зони лазерного впливу спостерігається у середньовуглецевих сталях, навіть у випадку незначного наповнення зони легуючими елементами. Під час оброблення сталі 40X зона лазерного оплавлення має мікротвердість значно вищу, ніж у сталі 45. Це свідчить про доцільність введення легуючих елементів як в основу сталі, так і через поверхневий шар зразка, що оброблюється (Казаків та ін., 2021). Результати дослідження впливу зміцнювальних домішок карбіду бору та карбіду вольфраму у поглинаючому покритті (гуаш жовта) подані на **рис. 2**.

Сталь 40X; Гуаш жовта + ВК12(WC);  $P = 250$  Вт



Сталь 40X; Гуаш жовта + В4С;  $P = 250$  Вт



**Рис. 2** – Зміна мікротвердості HV за глибиною зони  $l$  та швидкістю  $V$  лазерного оброблення за різних варіантів покриттів (Казаків та ін., 2021):  
а – гуаш жовта + ВК12; б – гуаш жовта + В4С

Лазерне термозміцнення сталей може використовуватися також для підвищення зносостійкості поверхні деталей, що працюють в умовах тертя. Особливі структури у шарах за лазерного оброблення поверхонь деталей можна отримати лише використовуючи висококонцентровані джерела енергії, зокрема лазери. Зносостійкість сталі 45 після лазерного термозміцнення збільшується більш ніж у 2–4 рази порівняно зі сталлю, що загартована у звичайний спосіб. Також лазерне оброблення зразків, що виготовлені зі сталі 40X, підвищує зносостійкість порівняно із звичайним загартуванням та відпуском. У випадку лазерного оброблення безперервним CO<sub>2</sub>-лазером зразків зі сталей 45 і 40X без оплавлення поверхні підвищується втомна міцність сталей.

### ВИСНОВКИ

Лазерне зміцнення поверхні сталевих деталей автомобільного транспорту дозволяє отримати позитивні результати за оброблення сталей, які мають у своєму складі вміст вуглецю більший за 0,3% і достатній вміст легуючих елементів, що дозволяють отримати тверді фази.

У результаті проведеного дослідження впливу поглинаючих покриттів на глибину лазерного оброблення сталі 45 визначено, що найкращі результати спостерігаються у випадку використання покриттів, які містять сажу у вигляді аерозолі, а також оксиди алюмінію та цинку, що забезпечує значне збільшення глибини зони лазерного впливу.

У випадку ефективного застосування поглинаючих покриттів відбувається значне підвищення коефіцієнта корисної дії лазера, що дозволяє використовувати лазер меншої потужності та сприятиме зниженню вартості зміцнення деталей автомобільного транспорту.

Дослідження лазерного зміцнення сталі 40X дозволяє зробити висновки, що для отримання зносостійких шарів на поверхні

деталей необхідно наносити поглинаюче покриття, а також застосовувати поверхневе легування. У цьому випадку найбільшу зносостійкість мають шари, що леговані боридними, карбідними, нітридними та оксидними фазами. Для сталевих деталей вибирати режими лазерного зміцнення необхідно з урахуванням багатьох чинників. До цих факторів належать матеріали, з яких виготовлені деталі автомобільного транспорту, їх хімічний склад, вимоги до маси та форми, вимоги щодо фізико-механічних властивостей і умов експлуатації. Найбільш перспективним для лазерного зміцнення деталей є процес із використанням лазерів безперервної дії.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Dobras, D., & Rutkowska-Gorczyca, M. (2019). The use of color etching to study the microstructure of laser welded steel used in the automotive industry. *Materials Testing*, 61(11), 1087-1094. <https://doi.org/10.3139/120.111424>
- Григорьянц, А. Г., Шиганов, И. Н., & Мисюров, А. И. (2008). *Технологические процессы лазерной обработки (Technological processes of laser handling)*. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
- Казаков, С. С., Федосеев, А. В., & Матвеев, Ю. И. (2021). Упрочнение среднеуглеродистых сталей за счет микролегирования поверхностей (Strengthening of medium-carbon steels due to micro-alloying of surface). *Вестник НГИЭИ*, 4(119), 51-61. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-4-51-61>
- Ковальчук, Ю. О., Пушка, О. С., & Войтик, А. В. (2017). Влияние поглинающих покрытий на глубину лазерной обработки деталей сельскохозяйственной техники из стали 45 (Effect of absorbing coatings on the depth of laser processing of agricultural machinery parts from steel 45). *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*, 30, 16-21.



## PREDICTION OF SERVICE LIFE OF REPAIRED PART SURFACE

S. Khomych\*, I. Tsiz, V. Satsiuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---



### ABSTRACT

*Agricultural machinery parts have a life expectancy that depends on operating conditions and quality service. Eventually, parts fail and need to be rebuilt. Repair work makes it possible to extend the function of the part for a certain period of time. When repairing parts, it is necessary to predict the period of their further operation. It is quite problematic to restore the defective parts because the repair technologies are outdated. The use of non-traditional repair technologies requires an assessment of the quality of the repaired product, which includes the determination of the maximum period of its future operation. In general, the durability of repaired parts depends on the correct choice of restoration method, the quality of the work performed, the accuracy of the tool, the qualifications of the workers, etc. The article discusses the method of predicting the state of the coupling based on allowable values during diagnosis. This makes it possible to determine the period of further operation of the coupling until the next inspection, if the period of operation is known. Prediction methods based on calculated permissible parameter values and special tables are also used to determine repair dates. The most common method of processing information to predict the remaining life of parts is the use of nomograms. Nomograms are created on the basis of the results of calculations based on empirical equations that relate the remaining life to the initial value of the measured parameter, the number of kilometers travelled since the start of operation, the value of the measured parameter at the current time and the limit value of the parameter. The improved method of predicting the service life of the repaired part allows you to assess the condition of the repaired part by determining the service life indicators in percent according to the selected influencing factors. By using previously known influencing factors and applying an advanced prediction method, it is possible to determine the service life of a part even before repair work is carried out.*

#### **Key words:**

predicting of part serviceability,  
part repair,  
repair of equipment,  
durability of parts,  
work resource

#### **Article history:**

Received 14.05.2023

Accepted 18.06.2023

#### **\*Corresponding author:**

smhh@ukr.net

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1061

#### **To cite this article:**

Khomych, S., Tsiz, I., & Satsiuk, V. (2023). Prediction of service life of repaired part surface. *Agricultural Machines*, 49, 105-110. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1061>

УДК 631.3:629.08

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВІДРЕМОНТОВАНОЇ  
ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ****С.М. Хомич\*, І.Є. Цизь, В.В. Сацюк***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Деталі сільськогосподарських машин мають певний термін працездатності, який залежить від умов експлуатації та якісного сервісного обслуговування. Деталі спрацьовуються та потребують відновлення. Ремонтні роботи дозволяють продовжити функціонування деталі на певний період. Під час ремонту деталей необхідно прогнозувати термін їх подальшої експлуатації. Відновлювати спрацьовані деталі досить проблематично, оскільки технології ремонту є застарілі. Однак, застосування нетрадиційних технологій відновлення вимагає оцінювання якості відремонтованого виробу, що передбачає визначення максимального терміну його експлуатації в майбутньому. Загалом довговічність відремонтованих деталей залежить від правильного вибору методу їх відновлення, якості виконаної роботи, точності інструменту, кваліфікації працівників тощо. Для визначення термінів ремонту використовують методики прогнозування за обчисленими допустимими значеннями параметрів та спеціальні таблиці. Найпоширенішим способом оброблення інформації для прогнозування залишкового ресурсу роботи деталей є застосування номограм. Номограми побудовані за результатами обчислень за емпіричними рівняннями, які пов'язують залишковий ресурс із початковим значенням вимірювального параметра, пробігом з початку експлуатації, значенням вимірювального параметра в поточний момент, а також з граничним значенням параметра. Запропонована у статті методика прогнозування терміну працездатності відремонтованої деталі дозволяє оцінити її стан шляхом визначення показників довговічності за показниками, що впливають на неї. Користуючись заздалегідь відомими факторами впливу та застосувавши запропонований метод прогнозування можна визначити термін працездатності деталі, ще до проведення ремонтних робіт.

**Ключові слова:**

прогнозування  
працездатності деталі,  
ремонт деталей,  
ремонт техніки,  
довговічність деталей,  
ресурс роботи

**Історія публікації:**

Отримано 14.05.2023

Затверджено 18.06.2023

**\*Автор для листування:**

smhh@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1061

**Цитувати цю статтю:**

Хомич, С. М., Цизь, І. Є., & Сацюк, В. В. (2023). Прогнозування терміну працездатності відремонтованої поверхні деталі. *Сільськогосподарські машини*, 49, 105-110. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1061>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Деталі всіх сільськогосподарських машин мають певний термін працездатності, який залежить від умов експлуатації та якісного сервісного обслуговування. З часом деталі спрацьовуються та потребують відновлення. Ремонтні роботи дозволяють продовжити функціонування деталей на певний період. Під час ремонту деталей необхідно прогнозувати термін їхньої подальшої експлуатації, щоб забезпечити «життєвий цикл» всієї системи механізму та машини в цілому.

На універсальні ремонтні підприємства сільськогосподарських машин надходить техніка з різними несправностями, що спричинені завершенням робочого ресурсу машини. На сьогодні в Україні понад 65% сільськогосподарської техніки закордонних зразків (*Дослідження ринків, 2020*). Хоча ця техніка вважається «ною» та ресурс її роботи майже вичерпаний. Відновлювати спрацьовані деталі досить проблематично, оскільки технології ремонту є застарілі. Потрапляння у виробничі майстерні несправних вузлів та деталей машин з індивідуальними методами відновлення на сьогодні складає 50% від загальної кількості потужності підприємства. Застосування нових, нетрадиційних технологій відновлення деталей вимагає оцінювання якості відремонтованих виробів, що передбачає визначення максимального терміну їхньої експлуатації в майбутньому.

Довговічність відремонтованих деталей залежить від правильного вибору методу їх відновлення, якості виконаної роботи, точності інструменту, кваліфікації працівників (*Михлин, 1984*). Невідповідність вибраного способу відновлення властивостям деталі спричиняє втрати її функціональних можливостей та унеможлиблює післяремонтне використання (*Гранкін та ін., 1998*). Правильний вибір технологічного процесу відновлення деталей з неякісним його виконанням на застарілому обладнанні спричиняє повторне руйнування та спрацювання деталей в тому ж місці (*Сковородин & Тишкин, 1985*). Це може зумовити навіть більш катастрофічні наслідки, оскільки спричинить вихід з ладу всієї системи механізму.

Отже, після виконання ремонтних робіт виріб обов'язково необхідно випробувати та проводити контроль для виявлення недоліків і

дефектів. Перевіряти якість ремонту деталей та прогнозувати термін їх працездатності необхідно із використанням сучасних методик. Для цього ремонтні підприємства потребують постійної модернізації.

У працях (*Сковородин & Тишкин, 1985; Овчаров, 1990; Тамразян, 2012*) висвітлено методику прогнозування стану спряження деталі за допустимими значеннями під час діагностування. Це дозволяє встановити термін подальшої експлуатації спряження до наступної перевірки, за умови, що термін напрацювання є відомим. Для застосування методики необхідно знати допустиме значення коефіцієнта використаного ресурсу.

Пропонується за значеннями коефіцієнта залишкового ресурсу та періодичністю перевірок стану спряження оцінювати межі допустимих значень параметра спрацювання. Якщо відомо, що граничним значенням коефіцієнта використаного ресурсу є одиниця, а періодичність перевірок  $t$ , тоді має виконуватися умова:

$$1 = at^{\alpha}. \quad (1)$$

Залежність між коефіцієнтом залишкового ресурсу  $R_{зал.}$  та тривалістю роботи має вигляд:

$$R_{зал.} = 1 - at^{\alpha}. \quad (2)$$

Отже, виконавши обчислення можна прогнозувати термін роботи спряження.

Проводити громіздкі обчислення під час діагностування спряжень незручно, тому використовують спеціальні таблиці, в яких подані результати обчислень для типових спряжень з урахуванням часу напрацювання деталей. Традиційна методика прогнозування забезпечує експлуатацію спряження, що діагностувалося, від планового до наступного діагностування.

Для визначення термінів ремонту також використовують методики прогнозування за обчисленими допустимими значеннями параметрів і спеціальні таблиці (*Мозгалевский & Гаскаров, 1975; Погорельий, 1981*). Методи досить подібні між собою, на їх основі проводять порівняння одержаних значень параметрів із допустимими значеннями або значення коефіцієнта використаного ресурсу з напрацюванням. Ці значення отримують з довідкових таблиць, які складені на основі

багаторічних спостережень, випробувань та експериментів. Цей метод є простим для визначення залишкового ресурсу деталі у випадку діагностування однотипних деталей. Однак, для ремонту індивідуальних деталей або ж деталей підвищеної складності подібних таблиць немає. Тому точність прогнозування не дуже висока, оскільки табличні значення не враховують фактичного напрацювання до ремонту. Значення, які подаються в таблиці, є середніми та наближеними.

Найпоширенішим способом оброблення інформації для прогнозування залишкового ресурсу роботи деталей є застосування номограм. Номограми, що побудовані за результатами обчислень за емпіричними рівняннями, які пов'язують залишковий ресурс із початковим значенням вимірювального параметра, пробігом з початку експлуатації, значенням вимірювального параметра в поточний момент, а також з граничним значенням параметра (Аулін та ін., 2015):

$$t_{\text{зал.}} = t \left( \alpha \sqrt{\frac{D_{\text{lim}} - D_0}{D - D_0}} - 1 \right), \quad (3)$$

де  $D_0$ ,  $D_{\text{lim}}$ ,  $D$  – відповідно, початкове, граничне та фактичне значення параметра;  $t$  – термін напрацювання деталі;  $\alpha$  – показник степеня.

Користуватися номограмами досить зручно, швидко та легко, а створення нових номограм для визначення залишкового ресурсу спряжень деталі потребує додаткових обчислень та досліджень.

Сучасна сільськогосподарська техніка для оброблення ґрунту передбачає раціональні режими роботи для захисту робочих органів від швидкого спрацювання. Обґрунтовуються ці режими роботи техніки за результатами експериментальних досліджень взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з певним типом ґрунту (АГРОБІЗНЕС, n.d.). Переважно досліджується вплив абразивності ґрунту на спрацювання поверхні робочого органа. Відповідно, рекомендовані режими роботи не дозволяють оцінити довговічність деталі, оскільки вона може тріснути від навантажень і коливань, втратити пружні властивості, отримати пошкодження від удару тощо. Отже, актуальним завданням є розроблення нових методів прогнозування терміну працездатності деталей після ремонту.

**Мета дослідження** – удосконалення методики розрахунку терміну працездатності відремонтованої поверхні деталі.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Під час розроблення методики розрахунку терміну працездатності поверхні деталі після ремонту використовувалися загальновідомі методики розрахунку цього показника та математичне планування експерименту за планом Бокса-Бенкіна.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Прогнозування ресурсу роботи деталі, вузла, механізму чи сільськогосподарської машини після ремонту досить складний процес та передбачає необхідність врахування умов роботи машини під час її експлуатації. Спрацьована деталь будь-якої машини, що є ремонтпридатною, після відновлення знову повертається до початкового стану. Перед її видаванням замовнику ремонтне підприємство має надати талон з зазначеним гарантійним терміном експлуатації. Як правило, цей термін є однотипним для виконаних ремонтних робіт та досить коротким (мінімальним), оскільки під час його визначення урахується можливий ризик майбутніх незапланованих витрат підприємства. Цей термін не вказує тривалість максимального можливого періоду роботи відремонтованої деталі, а лише гарантує стабільність роботи упродовж вказаного періоду (Амиров и др., 1990). Однак, відремонтована поверхня деталі потребує точних прогнозів максимального терміну працездатності та показників довговічності її експлуатації. Такі прогнози необхідно виконувати перед початком ремонтних робіт, щоб переконатися в доцільності проведення ремонтних робіт і, відповідно, витрачання часу на відновлення. Бо, можливо, краще замінити спрацьовану деталь на нову.

Прогнозування максимального терміну працездатності відремонтованої поверхні можна здійснити, використавши математичний метод розрахунку, який створений на основі методики Бокса-Бенкіна (Адлер и др., 1986). Для проведення обчислень доцільно на основі цієї методики у програмному середовищі Mathcad 14 створити шаблон для показників відновлення та умов використання деталі. Створений шаблон можна використовувати

для прогнозування терміну працездатності відновлених деталей різної складності. Показники, які необхідно враховувати під час розрахунку, мають характеризувати стан деталі та якість виконаної роботи з її відновлення. Рекомендується, щоб кількість показників, за якими буде оцінюватися термін працездатності деталі після ремонту, була щонайменше – три. Методика розрахунку передбачає визначення значущості цих показників, базуючись на результатах якого відбуватиметься прогнозування подальшого терміну працездатності відновленої деталі. За результатами обчислень буде отримана поверхня відгуку, яка дозволить визначити значення шуканої величини.

За базовий період працездатності деталі необхідно прийняти термін ресурсного використання виробу до потрапляння на ремонт. До показників довговічності виробу необхідно обов'язково віднести значення граничного параметру зношення, а також інші, від яких залежить довговічність. Інтенсивність спрацювання деталей залежить від показників: геометричних; температурних; режимних (робочого навантаження, швидкості, пікового навантаження, згинальних напружень, частота обертання, потужності, згинального зусилля, зусилля кручення, коливань, вібрації тощо); якості ремонту (параметри міцності, твердості, однорідності матеріалу деталі, гартування, напилення, накатування тощо); агресивного середовища, за умов якого працювала деталь чи працюватиме (параметри тертя, мащення, забруднення тощо).

Для переведення значень показників, що впливають на прогнозований термін роботи деталі після ремонту, у безрозмірні величини проводиться їх кодування (Котеленец и др., 2003; Воробьев, 2004). Наприклад, вирази для  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  кодованих параметрів матимуть вигляд:

$$x_1 = \frac{a - a_0}{\varepsilon_1}, x_2 = \frac{b - b_0}{\varepsilon_2}, x_3 = \frac{c - c_0}{\varepsilon_3}, \dots, \\ x_n = \frac{z - z_n}{\varepsilon_n}, \quad (4)$$

де  $a, b, c, \dots, z$  – розмірні значення показників;  $a_0, b_0, c_0, \dots, z_0$  – розмірні допустимі значення показників;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n$  – інтервали варіювання показників.

Значення терміну працездатності деталей після ремонту за різних комбінацій вибраних параметрів (відповідно до плану-матриці плану Бокса-Бенкіна) визначаються з довідників або експериментальним шляхом. Обчислюються коефіцієнти рівняння регресії відповідно до методики (Венецкий & Венецкая, 1974; Герасимович, 1983; Адлер и др., 1986). Після обчислення значень коефіцієнтів рівняння регресії визначається їх значущість. За отриманим рівнянням регресії будуються поверхні відгуку та визначається шуканий параметр (термін працездатності деталі).

## ВИСНОВКИ

Удосконалена методика прогнозування терміну працездатності відремонтованої деталі дозволяє оцінити стан відремонтованої деталі шляхом визначення показника довговічності. Користуючись відомими параметрами впливу, а також застосувавши удосконалений метод прогнозування можна визначити термін працездатності деталі, ще до проведення ремонтних робіт.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- АГРОБІЗНЕС. (n.d.). *Раціональний підхід до обробітку ґрунту (A rational approach to soil cultivation)*. Retrieved April 03, 2023, from <https://agrobusiness.com.ua/>
- Адлер, Ю. П., Маркова, Е. В., & Грановский, Ю. В. (1976). *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (Planning an experiment in the search for optimal conditions)*. М.: Наука.
- Амиров, Ю. Д., Алферова, Т. К., Волков, П. Н. и др. (1990). *Технологичность конструкции изделия: Справочник (Manufacturability of product design: Reference book)*. М.: Машиностроение.
- Аулін, В. В., Каліч, В. М., Голуб, Д. В., & Гриньків, А. В. (2015). Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів та систем транспортних засобів сільськогосподарського виробництва за їх технічним станом (*Forecasting the residual life of components and vehicles agriculture for their technical state*). *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 45(2), 28-36.
- Венецкий, И. Г., & Венецкая, В. И. (1974). *Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе (Basic mathematical and statistical concepts and formulas in economic analysis)*. М.: Статистика.
- Воробьев, В. Э. (2004). *Прогнозирование срока службы электрических машин (Predicting the life of electrical machines)*. СПб.: СЗТУ.

- Герасимович, А. И. (1983). *Математическая статистика (Math statistics)*. Минск: Вышэйш. школа.
- Гранкін, С. Г., Малахов, В. С., Черновол, М. І., & Черкун, В. Ю. (1998). *Надійність сільськогосподарської техніки (Reliability of agricultural technology)*. К.: Урожай.
- Дослідження ринків. (2020). *Аналіз ринку сільськогосподарської техніки України і Росії. 2020 рік (Market analysis of agricultural machinery in Ukraine and Russia)*. Retrieved April 05, 2023, from <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/rynok-selskochozajstvennojtehniki-ukrainy-i-rossii-2020-god>
- Котеленец, Н. Ф., Акимова, Н. А., & Антонов, М. В. (2003). *Испытание, эксплуатация и ремонт электрических машин (Testing, operation and repair of electrical machines)*. М.: Издательский центр «Академия».
- Михлин, В. М. (1984). *Управление надежностью сельскохозяйственной техники (Agricultural machinery reliability management)*. М.: Колос.
- Мозгалеvский, А. В., & Гаскаров, Д. В. (1975). *Техническая диагностика (непрерывные объекты) (Technical diagnostics (continuous objects))*. М.: Высшая школа.
- Овчаров, В. В. (1990). *Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве (Operating modes and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production)*. Киев: Изд-во УСХА.
- Погорелый, Л. В. (1981). *Инженерные методы испытаний сельскохозяйственных машин (Engineering testing methods for agricultural machines)*. К.: Техника.
- Сковородин, В. Я., & Тишкин, Л. В. (1985). *Справочная книга по надежности сельскохозяйственной техники (Reference book on the reliability of agricultural machinery)*. Л.: Лениздат.
- Тамразян, А. Г. (2012). Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности (*Design of structural elements in the event of the preset reliability, regular load and bearing capacity distribution*). *Вестник МГСУ*, 10, 109-115.

## STUDY OF THE POSITIONING ACCURACY OF MACHINE-TRACTOR UNITS FOR WORKING ON SLOPES

V. Satsiuk\*, R. Kirchuk, S. Khomych

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### ABSTRACT

*In Ukraine, a precision farming system based on geo-information technologies is used. The quality of technological operations depends on the accuracy of the positioning of the machine-tractor unit. In Ukraine, a large part of agricultural land is located on slopes. When using machine-tractor units equipped with navigation devices without gyroscopes on slopes, the accuracy of positioning depends on the errors caused by both correction signals and the angle of inclination of the working area. In the article, theoretical studies are carried out on the influence of the height of the antenna of the navigation equipment and the angle of transversal inclination of the working area of the field on the positioning error of the unit. It has been found that the positioning error of the unit caused by the transverse inclination of the site increases significantly with the increase in the angle of inclination of the site and the height of the antenna location. To confirm the theoretical data, a multivariate experiment was carried out using the non-composite Box-Behnken plan. The ASN-Agro parallel drive system with ASN-Agro VI.03 software was used to investigate the positioning accuracy of the machine-tractor unit. For the experimental studies, a machine-tractor unit was used, consisting of MTZ1221 tractor, OGN 800/16 sprayer and ASN-Agro parallel drive system. The research was carried out taking into account the following factors: the height of the antenna of the navigation equipment, the angle of the transverse inclination of the working area, the speed of the machine-tractor unit. The height of the antenna of the navigation equipment above the surface of the working area was 1–2.8 m. The transverse tilt angle of the work area was 0–3 degrees. Based on the results of the research, regression equations were obtained and response surfaces were constructed. The analysis of the experimental data shows that the angle of transversal inclination of the field surface and the height of the antenna of the navigation equipment have a significant influence on the accuracy of the positioning of the unit.*

### Key words:

positioning accuracy of the machine-tractor unit, navigation system, work on slopes, parallel driving system, precision farming

### Article history:

Received 16.05.2023

Accepted 19.06.2023

### \*Corresponding author:

satsyukvasyl@lutsk-ntu.com.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1062

### To cite this article:

Satsiuk, V., Kirchuk, R., & Khomych, S. (2023). Study of the positioning accuracy of machine-tractor units for working on slopes. *Agricultural Machines*, 49, 111-116. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1062>



УДК 629.783:631.3

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ПРИ РОБОТІ НА СХИЛАХ****В.В. Сацюк\*, Р.В. Кірчук, С.М. Хомич***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

*В Україні використовується система точного землеробства, що базується на геоінформаційних технологіях. Якість виконання технологічних операцій залежить від точності позиціонування машино-тракторного агрегата. В Україні значна частина сільськогосподарських угідь розташована на схилах. У випадку використання на схилах агрегатів, що оснащені навігаційним обладнанням без гіроскопа, точність позиціонування буде залежати від похибок, які зумовлені як сигналами корекції, так і кутом нахилу робочої ділянки. У статті проведено теоретичні дослідження впливу висоти розташування антени навігаційного обладнання та кута поперечного нахилу робочої ділянки поля на похибку позиціонування агрегата на полі. Встановлено, що похибка позиціонування агрегата, яка зумовлена поперечним схилом ділянки, суттєво зростає із збільшенням кута нахилу ділянки та висоти розташування антени. Для підтвердження отриманих теоретичним шляхом даних було проведено експеримент із використання некомпозиційного плану Бокса-Бенкена. Використовуючи систему паралельного водіння ASN-Agro із програмним забезпеченням ASN-Agro V1.03 досліджено точність позиціонування машино-тракторного агрегата. Для досліджень використовували машино-тракторний агрегат у складі: трактор МТЗ1221, оприскувач ОГН 800/16, система паралельного водіння ASN-Agro. Дослідження проводили з урахуванням факторів: висота розташування антени навігаційного обладнання, кут поперечного нахилу робочої ділянки, швидкість руху машино-тракторного агрегата. Висота розташування антени навігаційного обладнання над поверхнею робочої ділянки становила 1–2,8 м. Кут поперечного нахилу робочої ділянки становив 0–3 град. Аналіз експериментальних даних показує, що суттєвий вплив на точність позиціонування агрегата на полі мають кут поперечного нахилу поверхні поля та висота розташування антени навігаційного обладнання.*

**Ключові слова:**

точність позиціонування машино-тракторного агрегата, навігаційна система, робота на схилах, система паралельного водіння, точне землеробство

**Історія публікації:**

Отримано 16.05.2023

Затверджено 19.06.2023

**\*Автор для листування:**

satsyukvasyl@lutsk-ntu.com.ua

DOI: 10.36910/acm.vi49.1062

**Цитувати цю статтю:**

Сацюк, В. В., Кірчук, Р. В., & Хомич, С. М. (2023). Дослідження точності позиціонування машино-тракторних агрегатів при роботі на схилах. *Сільськогосподарські машини*, 49, 111-116. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1062>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В Україні глобальними навігаційними супутниковими системами (Global Navigation Satellite System – GNSS) є GPS, Galileo, ГЛОНАСС та Beidou (*Вечера та ін., 2018*). Система точного землеробства дозволяє підвищити точність виконання технологічних операцій під час вирощування різних сільськогосподарських культур. Точність позиціонування машино-тракторних агрегатів (МТА) скорочує до мінімуму пропуски та перекриття за суміжних проходів агрегатів полем. Використання системи глобального позиціонування дозволяє працювати агрегату в умовах поганої видимості, зокрема, у темний час доби. Використання системи глобального позиціонування підвищує продуктивність МТА (*Shibusawa, 2001; Finger et al., 2019*).

Точність позиціонування МТА особливо важлива за дистанційного зондування поверхні ґрунту, диференційованого внесення засобів захисту рослин, добрив та відбирання зразків ґрунту. Для реалізації технологій точного землеробства точність позиціонування МТА є недостатньою. Це спричинено цілою низкою факторів (*Neményi et al., 2003; Холодюк, 2020*): багатопроменевість розповсюдження сигналу; точність годинника супутника; атмосферні явища; орбіта супутника; похибка обчислення місця розташування рухомого об'єкта; GPS-приймачі.

Практика застосування навігаційного обладнання на мобільних МТА свідчить про те, що досить часто виникає ситуація із втратою сигналів із супутників GNSS. Основними факторами, що спричиняють ці втрати, є викривлення сигналів GNSS за умови прийому антеною відбитих променів та попадання антени МТА в зону «радіо тіней», що спричинені ЛЕП та лісосмугами (*Raj et al., 2021; Сацюк та ін., 2022*).

**Мета дослідження** – дослідити точність позиціонування МТА, що не обладнанні гіроскопом із навігаційним обладнанням, під час роботи на схилах.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для дослідження точності позиціонування МТА при роботі на схилах використовували: систему паралельного водіння ASN-Agro із програмним забезпеченням ASN-Agro V1.03;

МТА (трактор МТЗ 1221 та оприскувач ОГН 800/16); електронний магнітний кутомір; вимірювальну рулетку Stanley OPP Tylon. Експериментальні дослідження проводили за симетричним некомпозиційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку.

Для досліджень вибирали робочі ділянки з кутом поперечного нахилу  $\alpha = 0\text{--}3$  град. Кут нахилу робочої ділянки поля визначали за допомогою електронного кутоміра, який встановлювали за допомогою магніту на капоті трактора.

Точність позиціонування МТА на полі оцінювали за абсолютною похибкою згідно з методикою (*Сацюк, 2022*). Для цього у меню налаштування техніки вибирали ширину захвату штанги  $B = 16$  м. На випробувальному майданчику наносили базову лінію (пряму лінію довжиною 100 м.) Після цього скеровували МТА так, щоб центр антени розташовувався напроти нанесеної базової лінії. У програмному забезпеченні ASN-Agro V1.03 вводили точку  $A$  – початок гону, а через 100 метрів вводили точку  $B$  – кінець гону. Відповідно, отримали базову лінію, від якої програмне забезпечення ASN-Agro V1.03 побудувало паралельні прямі. У режимі руху паралельними прямими скеровували рух МТА вздовж побудованих ліній, використовуючи підказки на планшеті. У момент, коли відхилення положення МТА у програмному забезпеченні ASN-Agro V1.03 від побудованої лінії паралельного руху відповідало нулю, МТА зупиняли та вимірювали рулеткою фактичну відстань від базової лінії до центра антени. Абсолютну похибку позиціонування агрегата  $\Delta$  визначали за виразом:

$$\Delta = |L - B|, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – абсолютна похибка позиціонування агрегата, м;  $L$  – фактична відстань від базової лінії до центра антени, м;  $B$  – ширина захвату агрегата, м.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Антену навігаційного обладнання МТА встановлюється на кабіні або капоті трактора. Під час руху МТА з навігаційним обладнанням на рівнинній ділянці поля проєкція точки розташування антени на горизонтальну площину співпадає з поздовжньою віссю МТА.

У цьому випадку точність позиціонування МТА на робочій ділянці буде залежати від точності навігаційного обладнання та параметрів сигналів корекції. Якщо МТА виконує технологічні операції на схилах без гіроскопа, то на точність позиціонування МТА на полі, окрім точності навігаційного обладнання, буде впливати похибка, що викликана зміною положення розташування антени навігаційного обладнання відносно поздовжньої осі МТА.

Розглянемо рух МТА на ділянці поля з поперечним схилом, що характеризується кутом нахилу  $\alpha$  (рис. 1). Антена навігаційного обладнання встановлена на кабіні трактора (на рис. 1 – це точка  $M$ ). Введемо Декартову систему координат, вісь  $x$  якої паралельна горизонту. У випадку руху МТА на рівнинній ділянці ( $\alpha = 0$ ) проєкція точки  $M$  розташування антени на горизонтальну площину буде знаходитись у точці  $O$ . Якщо МТА рухається ділянкою із кутом поперечного нахилу  $\alpha \neq 0$ , то проєкція точки  $M$  на горизонтальну площину буде відхилена від поздовжньої осі МТА на величину  $OK$  (рис. 1). Величина  $OK$  буде додатковою похибкою позиціонування МТА у горизонтальній площині, а величина  $KN$  – у вертикальній площині (Сацюк, 2022).

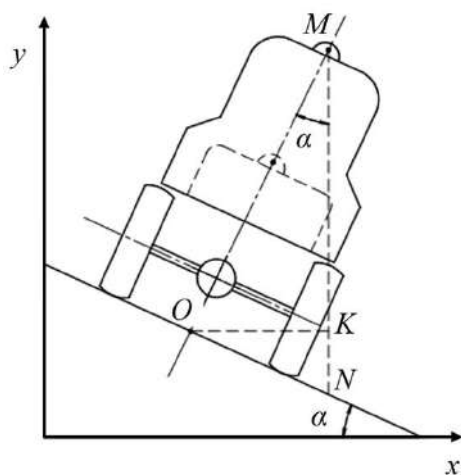


Рис. 1 – Схема до визначення похибки позиціонування МТА на ділянці поля з поперечним схилом

Для визначення величини відрізків  $OK$  та  $KN$  розглянемо прямокутний трикутник  $\Delta OKM$  (кут  $\angle OKM = 90^\circ$ ). Із трикутника  $\Delta OKM$  матимемо:

$$\Delta x = OK = MO \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

де  $\Delta x$  – похибка позиціонування МТА на полі в горизонтальній площині, см;  $MO$  – висота розташування антени на кабіні трактора МТА, см.

Визначимо похибку позиціонування МТА у вертикальній площині  $KN$ :

$$\Delta y = KN = MN - MK. \quad (3)$$

Очевидно, що  $MN$  та  $MK$  обчислюються за виразами (рис. 1):

$$MN = \frac{MO}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

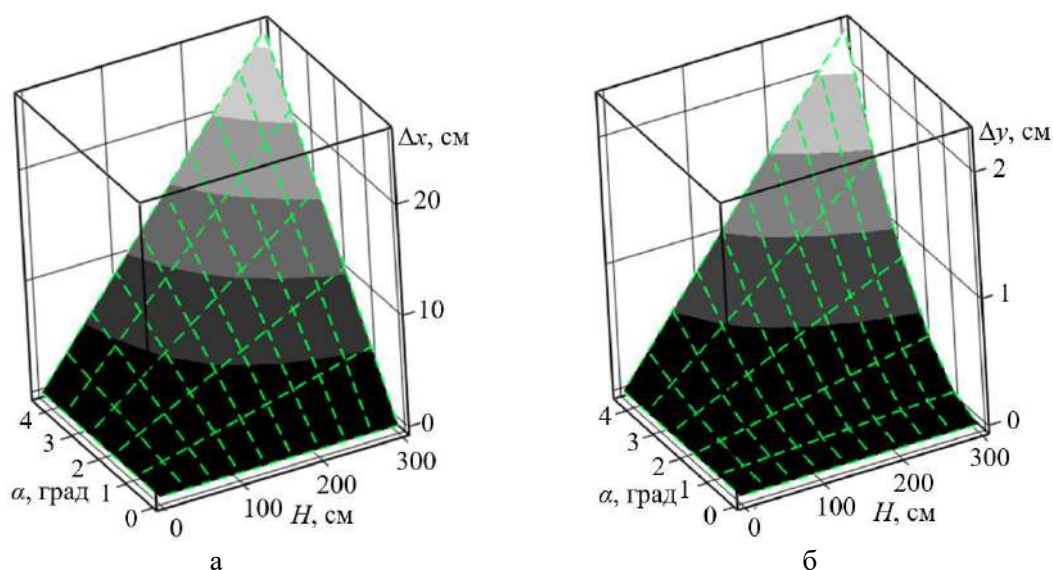
$$MK = MO \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Позначимо через  $H$  висоту розташування антени на кабіні трактора МТА, тобто  $MO = H$ . Ураховуючи заміну, підставимо вирази (4) та (5) у вираз (3), тоді матимемо:

$$\Delta y = H \left( \frac{1}{\cos \alpha} - \cos \alpha \right). \quad (6)$$

За виразами (2) та (6) побудовані графічні залежності похибок позиціонування МТА у горизонтальній  $\Delta x$  (рис. 2, а) та вертикальній  $\Delta y$  (рис. 2, б) площині від висоти розташування антени  $H$  та кута поперечного нахилу робочої ділянки поля  $\alpha$ . Аналіз побудованих графіків показує, що похибка позиціонування МТА, яка викликана поперечним схилом ділянки зростає із збільшенням кута нахилу ділянки  $\alpha$  та висоти розташування антени  $H$ .

Щоб перевірити точність позиціонування МТА із використанням системи паралельного водіння, було проведено трифакторний експеримент за методикою некомпозиційного плану Бокса-Бенкена. Дослідження проводили з урахуванням факторів: висота розташування антени навігаційного обладнання  $H$ , кут поперечного нахилу робочої ділянки поля  $\alpha$ , швидкість руху МТА  $V$ . Антену навігаційного обладнання ASN AGRO встановлювали на: передніх противагах трактора МТЗ-1221 (висота над рівнем поля  $H = 1$  м); капоті трактора МТЗ-1221 ( $H = 1,9$  м); кабіні трактора МТЗ-1221 ( $H = 2,8$  м).

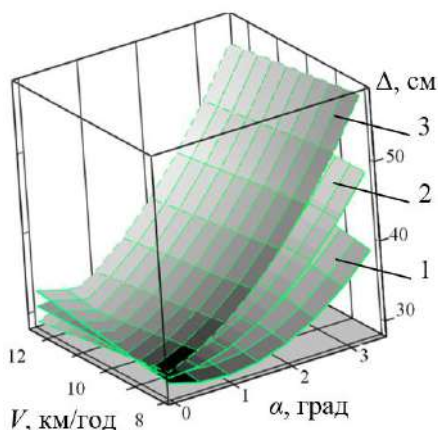


**Рис. 2** – Графічні залежності похибок позиціонування МТА у горизонтальній  $\Delta x$  (а) та вертикальній  $\Delta y$  (б) площині від висоти розташування антени  $H$  та кута поперечного нахилу робочої ділянки  $\alpha$

За результатами проведеного експерименту та математичного оброблення даних отримали рівняння регресії з факторами в натуральному вигляді (рис. 3):

$$\Delta = 7,46 - 6,63\alpha + 12,29H + 2,74V + 3,36\alpha H - 1,44VH + 2,05\alpha^2, \quad (7)$$

де  $\Delta$  – абсолютна похибка позиціонування МТА, см;  $\alpha$  – кут поперечного нахилу ділянки, град;  $H$  – висота розташування антени, м;  $V$  – швидкість руху агрегата полем, км/год.



**Рис. 3** – Поверхні відгуку  $\Delta = f(\alpha, H, V)$ :  
1 –  $H = 1$  м (розташування антени на передніх противагах трактора МТЗ-1221); 2 –  $H = 1,9$  м (розташування антени на капоті трактора МТЗ-1221); 3 –  $H = 2,8$  м (розташування антени на кабіні трактора МТЗ-1221)

## ВИСНОВКИ

За результатами досліджень встановлено, що суттєвий вплив на точність позиціонування МТА із використанням системи паралельного водіння без гіроскопа має кут поперечного нахилу ділянки поля та висота розташування антени навігаційного обладнання над рівнем поля. На поперечних схилах (до 3 град), у випадку розташування антени на кабіні трактора (висота розташування антени над поверхнею поля – 2,8 м), абсолютна похибка позиціонування МТА складає 50–55 см. Зміна швидкості руху МТА в межах 8–12 км/год не має суттєвого впливу на точність руху МТА із системою паралельного водіння ASN AGRO.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Finger, R., Swinton, S. M., Benni, N. E., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1). <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Neményi, M., Mesterházi, P. Á., Pecze, Z., & Stépán, Z. (2003). The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40(1-3), 45-55. [https://doi.org/10.1016/s0168-1699\(03\)00010-3](https://doi.org/10.1016/s0168-1699(03)00010-3)
- Raj, E. F. I., Appadurai, M., & Athiappan, K. (2021). Precision farming in modern agriculture. In Choudhury, A., Biswas, A., Singh, T.P., Ghosh, S.K. (eds) *Smart Agriculture Automation Using Advanced Technologies. Transactions on Computer Systems and Networks*. Springer, Singapore.

- [https://doi.org/10.1007/978-981-16-6124-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-16-6124-2_4)
- Shibusawa, S. (2001). Precision farming approaches for small scale farms. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(11), 22-27. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)34099-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)34099-5)
- Вечера, О. М., Роговський, І. Л., & Пастушенко, С. І. (2018). Навігаційні системи в технологіях точного землеробства (*Navigation systems in precision farming*). *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*, 296, 133-138. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2018.02.133-138>
- Сацюк, В. (2022). Дослідження точності руху машинно-тракторного агрегату із використанням глобальних навігаційних супутникових систем у технологічних операціях вирощування сої (*Study of the accuracy of the movement of machine-tractor units using Global Navigation Satellite Systems in technological operations of soybean cultivation*) [Кваліфікаційна робота магістра]. Луцький національний технічний університет, Луцьк.
- Сацюк, В. В., Дідух, В. Ф., & Федонюк, М. А. (2022). Дослідження якісних показників прийому сигналів GNSS навігаційним обладнанням машинно-тракторних агрегатів (*Research of quality indicators of GNSS signal receipt by navigation equipment of machine-tractor units*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 94-99. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.880>
- Холоднок, О. В. (2020). Глобальні навігаційні супутникові системи та їх роль у технологіях точного землеробства (*Global navigation satellite systems and their role in precision agriculture technologies*). *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2(109), 71-87. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-8>

## PECULIARITIES OF ENVIRONMENTAL INFLUENCE ON THE CONDITION OF FOREST PLANTATIONS IN UKRAINE

N. Kovalchuk\*, S. Petruk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---



### ABSTRACT

*The article describes the impact of environmental factors on the current state of forests in Ukraine. One of the most important problems of forest plantations is climate change, which has a global character. The forestry industry in Ukraine has been suffering for many years from the fact that oak and pine forests are in a weakened state or are drying out. Wet forest areas are drying up, as are swamps, which are part of forest ecosystems. One of the reasons for the drying out, especially in Polissia, is climate change, characterised by long periods of drought, as well as the reclamation of wetlands, which was carried out in the last century. The most negative impact on forest ecosystems is caused by anthropogenic activities, especially military actions, which have serious consequences. Forest fires are a negative factor, causing the destruction of flora, fauna and topsoil, and disrupting the normal functioning of the forest ecosystem. An anthropogenic factor that directly affects the condition of forest ecosystems and is characterized by rapid growth rates is economic activity, in particular the felling of mature stands for timber harvesting. During their implementation, the technological processes of logging do not always correspond to the specifics of the natural and climatic conditions of a given region. During logging, the soil is mixed, compacted and partially displaced, especially during the installation of the dragline and during the harvesting process. A decrease in forest productivity will lead to a series of irreversible negative processes, in particular: a decrease in carbon absorption; an increase in the duration of droughts; the drying out of certain forest types; an increase in the risk of fire; increased damage to plantations due to storms; the disappearance of part of the forest biotopes, namely wetlands and some swamps; the disappearance of areas with fir trees, particularly in Polissia, which will lead to a significant decrease in forest biodiversity. Priority should therefore be given to the conservation, restoration and protection of natural forests.*

### Key words:

forest plantations,  
forest,  
forest cuttings,  
forest fires,  
anthropogenic impact on the forest

### Article history:

Received 14.05.2023

Accepted 21.06.2023

### \*Corresponding author:

natalochka2325@gmail.com

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1060

### To cite this article:

Kovalchuk, N., & Petruk, S. (2023). Peculiarities of environmental influence on the condition of forest plantations in Ukraine. *Agricultural Machines*, 49, 117-123. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1060>

УДК 712.4

**ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА СТАН  
ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ УКРАЇНИ****Н.П. Ковальчук\*, С.Р. Петрук***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Описано вплив факторів навколишнього середовища на сучасний стан лісів України. Однією з найважливіших проблем лісових насаджень є зміни клімату, які мають глобальний характер. Лісова галузь України потерпає від того, що дубові та соснові ліси усихають. Спостерігається пересихання заболочених лісових територій, а також боліт, що є складовими лісових екосистем. Причинами пересихання, особливо на Поліссі, є зміни клімату, що характеризуються тривалими посухами, а також меліорація заболочених регіонів, яка проведена у минулому столітті. Найбільш негативний вплив на лісові екосистеми спричинено антропогенною діяльністю, зокрема воєнними діями, які зумовлюють важкі наслідки. Негативним фактором, який спричиняє знищення рослинного світу, надґрунтового покриву, а також порушує нормальне функціонування лісової екосистеми, є лісові пожежі. Антропогенним чинником, що безпосередньо чинить вплив на стан лісових екосистем та характеризується швидкими темпами зростання, є господарська діяльність, зокрема вирубування стиглих деревостанів з метою заготівлі деревини. Під час їх проведення технологічні процеси лісозаготівлі не завжди відповідають специфіці природно-кліматичних умов конкретного регіону. Під час проведення лісосічних робіт відбувається процес перемішування, ущільнення та часткового переміщення ґрунту. Зменшення продуктивності лісів зумовить цілу низку незворотних негативних процесів, зокрема: зменшення поглинання вуглецю; збільшення тривалості посухи; усихання певних типів лісу; зростання пожежної небезпеки; збільшення пошкодження насаджень через вітровали; зникнення частини лісових біотопів, а саме, заболочених ділянок лісу та деяких боліт; зникнення ділянок з ялинниками, зокрема у зоні Поліссі, що спричинить зменшення лісового біорізноманіття. Пріоритетом має стати збереження, відновлення та охорона природних лісів.

**Ключові слова:**

лісові насадження,  
ліс,  
лісові вирубки,  
лісові пожежі,  
антропогенний вплив на ліс

**Історія публікації:**

Отримано 14.05.2023

Затверджено 21.06.2023

**\*Автор для листування:**

natalochka2325@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1060

**Цитувати цю статтю:**

Ковальчук, Н. П., & Петрук, С. Р. (2023). Особливості впливу навколишнього середовища на стан лісових насаджень України. *Сільськогосподарські машини*, 49, 117-123. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1060>



## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На лісові насадження впливає багато факторів навколишнього середовища, що негативно позначається на їх загальному стані, який не відповідає еколого-біологічним вимогам функціонування лісових екосистем. Однією з найважливіших проблем лісових насаджень є зміна клімату, яка має глобальний характер та чинить вплив на всі природні екосистеми планети. Лісова галузь України багато років поспіль потерпає від того, що дубові й соснові ліси знаходяться в ослабленому стані або ж зовсім усихають.

Останні роки в Україні спостерігається пересихання заболочених лісових територій, а також боліт, що є складовими лісових екосистем. Причинами пересихання боліт, особливо на Поліссі, є зміни клімату, що характеризуються тривалими посухами, а також меліорація заболочених регіонів, яка була проведена у минулому столітті.

Кліматичні зміни, які торкнулися лісових екосистем та спричинили ослаблення лісових насаджень й пересихання надґрунтового покриву, надалі зумовлять відчутне зменшення продуктивності лісів, зниження поглинання лісовими екосистемами вуглецю та більш тривалі посухи. Також факторами, дія яких на лісові екосистеми в умовах сучасності спричиняє негативні наслідки, є лісові пожежі, незаконна вирубка, стихійні лиха, ураження лісових насаджень шкідниками та хворобами.

Пріоритет, що спрямований на збереження лісів та їх охорону, стає дедалі більш вагомим. Зниження рівня антропогенного впливу на природні та штучні екосистеми, їх відтворення і охорона є об'єктом дослідження вітчизняних та закордонних науковців. Зокрема, зазначена проблематика висвітлена у наукових працях, які стосуються урбоекології (Кучерявий, 2001), фітомеліорації (Кучерявий, 2003; Кучерявий, 2011), ландшафтної архітектури (Кучерявий та ін., 2004), а також еколого-біологічних проблем зелених насаджень міста (Ковальчук, 2006), урбанізації рослинного покриву сіл (Кучерявий та ін., 2011), характеристики рекреаційних навантажень на лісопаркові ландшафти міст (Кутя & Гірс, 2012), озеленення населених місць країни (Кучерявий & Кучерявий, 2020), оцінювання та використання рекреаційно-оздоровчих лісів (Миклуш & Миклуш, 2010). Незважаючи на зусилля, що докладають усі

вчені, ціла низка питань все ж залишається невирішеними.

**Мета дослідження** – вивчення сучасних проблем лісу, його відтворення, охорони та захисту лісових насаджень для забезпечення повноцінної діяльності лісових екосистем, зокрема підвищення стійкості і продуктивності лісових насаджень, їх корисних властивостей для задоволення потреб суспільства.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження передбачали вивчення впливу факторів навколишнього середовища на сучасний стан лісових насаджень. Об'єктом дослідження були лісові насадження України. Під час дослідження були застосовані методи порівняльного аналізу та синтезу інформації, спостереження, опису, узагальнення, а також математико-статистичний метод оброблення даних.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Найбільший негативний вплив на лісові екосистеми спричинено антропогенною діяльністю, зокрема воєнними діями, які зумовлюють важкі наслідки (Богомаз, 2022; Ковальчук & Толстушко, 2022): знищення рослинного і тваринного світу, отруєння атмосфери та водних ресурсів. Ці дії можна розцінювати як екоцид.

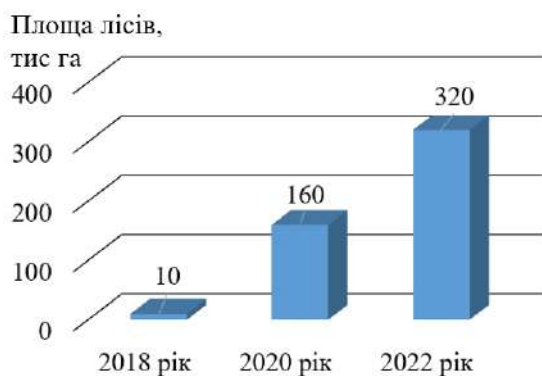
Негативним фактором, який спричиняє знищення рослинного та тваринного світу, надґрунтового покриву, а також порушує функціонування лісової екосистеми, є лісові пожежі. Причин виникнення цього лиха є кілька: антропогенна діяльність – через порушення населенням правил пожежної безпеки при поводженні з вогнем під час відпочинку в лісах або під час проведення робіт та використання несправної техніки в лісі; абіотичний фактор – лісові пожежі, що можуть виникати внаслідок дії несприятливих погодних умов, зокрема, тривалої відсутності опадів або сильних грозових розрядів, сильних вітрів, які сприяють швидкому поширенню вогню, високої температури повітря та перегрівання ґрунту, що спричиняють посуху та створюють сприятливі умови для самозаймання торфу; біотичний фактор – ураження лісових насаджень хворобами та шкідниками.

З початку до вересня 2022 року в Україні пожежами було охоплено загальну територію понад 2,4 млн га, з яких 1,5 млн га (64%) – це території, де проходять воєнні дії та окуповані території (рис. 1) (Богомаз, 2022).



**Рис. 1** – Причини виникнення лісових пожеж в Україні у 2022 році (станом на вересень) (Богомаз, 2022)

Внаслідок пожеж в Україні постраждали: лісів – 320 тис га; природних ландшафтів – 645 тис га; сільськогосподарських земель – 1340 тис га; забудованих територій – 129 тис га (Богомаз, 2022). Пожежі охопили 425 тис га природоохоронних територій, з яких 292 тис га на окупованих територіях та територіях, де проходять бойові дії (Богомаз, 2022). Якщо порівняти дані щодо лісових пожеж до початку повномасштабної війни в Україні, то, наприклад, у 2018 році площа лісів, що були охоплені пожежами, становила до 10 тис га. У 2020 році, внаслідок змін погодних умов та глобального потепління, пожежі охопили більше 160 тис га лісів (рис.2).



**Рис. 2** – Площа лісових пожеж в Україні в 2018, 2020 та 2022 роках

Антропогенним чинником, що впливає на стан лісових екосистем та характеризується швидкими темпами зростання, є господарська діяльність, зокрема вирубування стиглих деревостанів з метою заготівлі деревини. Під час проведення рубок технологічні процеси лісозаготівлі, як правило, не ураховують природно-кліматичні умови регіону.

Під час проведення лісосічних робіт відбувається перемішування, ущільнення та часткове переміщення ґрунту, зокрема під час влаштування волоки та в період заготівлі деревини. Зазвичай, найбільший вплив на лісові ґрунти чинять шляхи первинного транспортування деревини – волоки. Тому одним із основних заходів, що спрямований на екологізацію лісів, є раціоналізація первинного транспортування круглих лісоматеріалів, особливо пошук рішень з вибору оптимальних систем машин для наземного трелювання.

Ґрунтова поверхня лісотранспортних шляхів зазнає значних пошкоджень від рушіїв лісових машин та деревини, що трелюється. Ступінь цього пошкодження, у свою чергу, залежить як від типу лісотранспортного засобу (наземний чи повітряний), виду рушії (колісний чи гусеничний), маси трелювального засобу з деревиною, так і від характеристик лісового ґрунту. Внаслідок негативного впливу можна спостерігати пошкодження ґрунтового покриву.

Найчастіше зустрічаються геомеханічні пошкодження, зокрема, утворення колій, насипів та виїмок усіх форм локалізації: лінійних, точкових, площинних та об'ємних. Вони спричиняють значне ущільнення ґрунту на понад 50 см, яке зумовлює фітоценотичні порушення, зокрема, видозміни трав'яної рослинності, пошкодження дерев, знищення підросту. Зазначене ускладнює поновлення лісу, а також сприяє заміні цінних лісових порід малоцінними.

Лісова машина, рухаючись ґрунтовою поверхнею з низькою утримуючою здатністю, заглиблюється в ґрунт під дією сили власної ваги. Торфові ґрунти характеризуються меншою утримуючою здатністю, тому процес заглиблення машини підсилюється. Повторні проходи важких лісових машин тими ж маршрутами спричиняють утворення колій, що є характерним для цих ґрунтів. Утворення колій спричиняє значне ущільнення ґрунту. Під час руху лісові машини часто буксують,

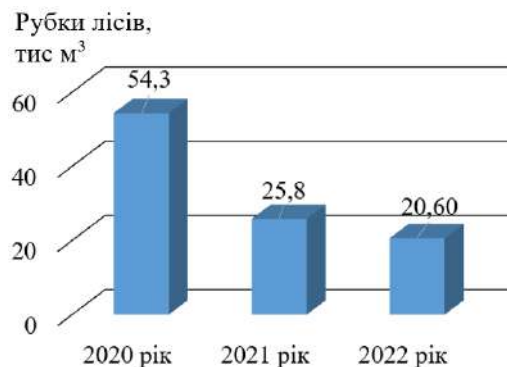
внаслідок чого руйнується опорна поверхня, зміщуються ґрунтові компоненти на глибину до 50 мм, пошкоджується коріння, що негативно впливає на структуру ґрунту.

Отже, трелювання деревини в зимовий період в умовах промерзлого ґрунту є найбільш ефективним та ощадливим, оскільки зменшує пошкодження ґрунтової поверхні. Цей спосіб трелювання деревини доцільно використовувати в умовах Полісся.

Для зони Полісся основними факторами ґрунтоутворення є: вологий клімат, наявність кислих безкарбонатних порід, рівнинний або ж слабохвилястий характер місцевості. Внаслідок взаємодії цих чинників у зоні Полісся основними є підзолистий, дерновий та болотний процеси ґрунтоутворення. Тому на підвищених елементах рельєфу утворилися дерново-підзолисті, опідзолені і чорноземні ґрунти. На відносно понижених елементах рельєфу, за близького залягання до поверхні рівнів ґрунтових вод, дернова стадія змінюється болотною. Отже, для зони Полісся характерними є великі площі заболочених ґрунтів – як мінеральних, так і торфових.

Ще одним негативним антропогенним фактором є незаконні рубки. У 2022 році незаконно вирубано понад 15 тис м<sup>3</sup> деревини, що спричинило збитків на понад 125 млн грн (*Відкритий ліс, 2022*). Боротися з незаконними вирубками сьогодні дуже складно, оскільки значну частину автотранспорту, що перебував у лісгоспах, передано Збройним силам України. Крім того, значна кількість лісівників перебуває у Збройних силах України (*Відкритий ліс, 2022*). Також робота системи спостереження за лісами в умовах воєнного стану не завжди дозволена. Першість поміж областей України, де здійснено найбільше незаконних рубок, займає Дніпропетровщина, Закарпаття та Київщина.

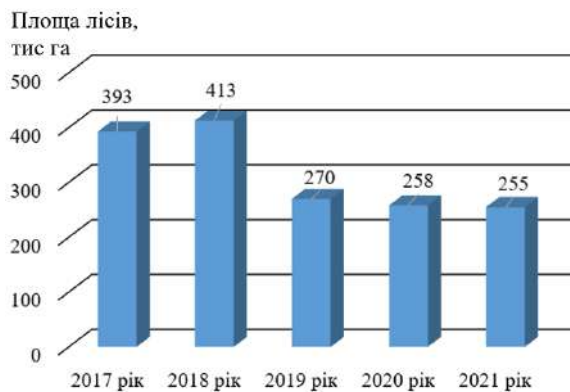
Незважаючи на проблеми, з якими стикається в умовах сучасності лісова галузь України, все ж працівники Державної лісової охорони намагаються постійно здійснювати охорону та захист лісів від незаконних рубок (**рис. 3**), пожеж, а також захищати їх від шкідників та хвороб у межах чинного законодавства. Обсяг незаконних рубок значно знизився за останні два роки: у 2022 році він становив лише 20,6 тис м<sup>3</sup>, що на 33,7% менше ніж у 2020 році.



**Рис. 3** – Незаконні рубки лісу в Україні

Одними з найвпливовіших негативних біотичних факторів є фітопатогенний та ентомологічний, які чинять вплив на сучасний стан лісів, оскільки природно-кліматичні умови та фізико-географічне положення України є сприятливим для масового розмноження та поширення шкідників й захворювань лісу. Площа лісів України становить 10,4 млн га (*Державне агентство лісових ресурсів України, n.d.a*), із них уражених шкідниками лісових ділянок понад 600 тис га, що становить близько 6%, третина з яких щорічно потребує проведення заходів боротьби. Найвищий відсоток ураження лісових екосистем шкідниками та хворобами лісу припадає на штучно створені ліси східних та південних областей України.

У Карпатському регіоні інтенсивне ведення лісового господарства спричинило зміни корінних смерекових деревостанів на біологічно нестійкі похідні, а комплексна дія техногенного забруднення та посилене рекреаційне навантаження значно знизили стійкість гірських лісів, що, у свою чергу, зумовило збільшення обсягів ураження їх хворобами та шкідниками, які сягнули понад 36 тис га. Також актуальною залишається проблема пошкодження ялиново-ялицевих й соснових насаджень однією з найбільш небезпечних хвороб – кореневою губкою, площа осередків якої складає понад 120 тис га. Однак, спостерігається зменшення усихання лісових насаджень внаслідок ураження їх хворобами та шкідниками порівняно з минулими роками (**рис. 4**). Лісопатологічна ситуація у лісах України є напруженою та потребує постійної уваги й оперативних дій з метою недопущення масового ураження.



**Рис. 4** – Динаміка площ усихання лісових насаджень України

До війни роботу із захисту лісу регулярно проводили сім Державних спеціалізованих підприємств, діяльність яких координувало Державне агентство лісових ресурсів України. Діяльність підприємств передбачала нагляд, облік шкідників та хвороб лісу, проведення лісопатологічних обстежень, призначення та проведення лісозахисних заходів, методична допомога лісокористувачам на місцях. Пріоритетний напрям діяльності цієї служби – розроблення та упровадження в практику біологічних засобів боротьби із шкідниками лісу, які є нешкідливими для людини і

навколишнього середовища та зможуть використовуватися у густонаселених регіонах України та у лісах, де використання хімічних засобів боротьби заборонене.

У зв'язку із воєнним станом в Україні у 2022 році не було випуску біологічного матеріалу для боротьби із шкідниками, а також не проводилися заходи боротьби із хворобами та шкідниками в лісових насадженнях. Частина територій та об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) розташована у зоні бойових дій, що унеможливує ведення господарської діяльності, або ж ушкоджена внаслідок необхідності будівництва оборонних споруд. Важка ситуація склалася й у тих районах, які перебували під окупацією, оскільки значна частина лісових площ замінована. Однак, лісова галузь намагається раціонально використовувати усі лісові ресурси та оптимально функціонувати. В областях, де бойові дії майже не проводилися, лісівники намагаються збільшувати площі ПЗФ з метою збереження біорізноманіття. Заповідання лісового фонду Держлісагентства станом на початок 2022 року та фактична лісистість областей України подана в **таблиці** (Державне агентство лісових ресурсів України, *n.d.b*).

**Таблиця** – Заповідання лісового фонду Держлісагентства станом на початок 2022 року та фактична лісистість областей України (Державне агентство лісових ресурсів України, *n.d.b*)

Обласні управління Держлісагентства	Заповідання в області, %	Фактична лісистість області, %	Обласні управління Держлісагентства	Заповідання в області, %	Фактична лісистість області, %
1	2	3	4	5	6
Вінницьке	12,4	13,1	Миколаївське	27,8	4,0
Волинське	24,0	31,0	Одеське	25,1	6,1
Дніпропетровське	13,1	5,6	Полтавське	16,9	8,6
Донецьке	34,0	6,9	Рівненське	11,8	36,4
Житомирське	12,0	33,6	Сумське	11,4	17,8
Закарпатське	11,8	51,4	Тернопільське	21,7	13,3
Запорізьке	21,3	3,7	Харківське	15,6	12,0
Івано-Франківське	14,1	41,0	Херсонське	18,6	4,1
Київське	6,1	22,2	Хмельницьке	26,1	12,8
Кіровоградське	18,4	6,7	Черкаське	5,5	15,1
Луганське	11,0	11,0	Чернівецьке	31,7	29,2
Львівське	21,5	28,5	Чернігівське	22,2	20,9

## ВИСНОВКИ

Факторами навколишнього середовища, що чинять негативний вплив на стан лісових насаджень, є лісові пожежі, геомеханічні порушення, незаконні рубки, техногенне забруднення, рекреаційне навантаження, зміни клімату, хвороби та шкідники лісу. У зв'язку з воєнними діями в Україні, пріоритет, який був спрямований на збереження лісів та їх охорону, стає менш вагомим, а іноді й зовсім втрачається. Війна спричиняє велику шкоду лісовій галузі та унеможливорює її повноцінне функціонування.

Зменшення продуктивності лісів зумовить цілу низку незворотних негативних процесів, зокрема: зменшення поглинання вуглецю; збільшення тривалості посухи; усихання лісу; зростання пожежної небезпеки; збільшення пошкодження насаджень через вітровали; зникнення частини лісових біотопів, а саме, заболочених ділянок лісу та деяких боліт; зникнення ділянок з ялинниками, зокрема на Поліссі, що зменшить лісового біорізноманіття.

Отже, пріоритетом має стати збереження, відновлення та охорона природних лісів. Кожна екосистема володіє здатністю до самовідновлення, тому знищені лісові масиви невдовзі почнуть відновлюватися природнім шляхом та стануть стійкішими до впливу факторів навколишнього середовища.

Суспільство має розуміти важливість лісів і дбайливо ставитися як до лісових екосистем, так і до навколишнього середовища в цілому, забезпечуючи гармонію існування з природою.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Богомаз, М. (2022). *Через пожежі у 2022 році Україна вже втратила в 30 разів більше лісів, ніж у попередні періоди (Due to fires in 2022, Ukraine has already lost 30 times more forests than in previous periods)*. Retrieved May 4, 2023, from <https://rubryka.com/2022/11/03/cherез-pozhezhi-u-2022-rotsi-ukrayina-vzhe-vtratyta-v-30-raziv-bilshe-lisiv-nizh-u-poperedni-periody-wwf-ukrayina/>
- Відкритий ліс. (2022). *В Держлісагентстві придумали, як побороти масштабні незаконні рубки (The State Forestry Agency has come up with a way to combat large-scale illegal logging)*. Retrieved May 11, 2023, from <https://www.openforest.org.ua/245007/>
- Державне агентство лісових ресурсів України. (n.d.a). *Загальна характеристика лісів України (General characteristics of the forests of Ukraine)*. Retrieved May 10, 2023, from <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini>

- Державне агентство лісових ресурсів України. (n.d.b). *Публічний звіт голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2022 рік (Public report of the head of the State Forest Resources Agency of Ukraine for 2022)*. Retrieved May 12, 2023, from [https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/publich\\_zvit/publichnii-zvit-za-2022.pdf](https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/publich_zvit/publichnii-zvit-za-2022.pdf)
- Ковальчук, Н. П. (2006). *Еколого-біологічні особливості формування зелених насаджень м. Луцька (Ecological and biological features of the formation of green spaces in the city of Lutsk)* [Дисертація канд. с.-г. наук]. Волинський державний університет ім. Лесі Українки, Луцьк.
- Ковальчук, Н. П., & Толстушко, Н. О. (2022). *Лісові фітоценози України в умовах воєнного стану (Forest phytocoenoses of Ukraine under conditions of marital state)*. *Сільськогосподарські машини*, 48, 88-92. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.879>
- Кутя, М. М., & Гірс, О. А. (2012). *Характеристика рекреаційних навантажень та рекреаційної місткості лісопаркових ландшафтів Києва (Description of recreational loading and recreational capacity of Kyiv forest park landscapes)*. *Науковий вісник НЛТУ України*, 22(12), 86-90.
- Кучерявий, В. П. (2001). *Урбоекологія (Urboecology)*. Львів: Світ.
- Кучерявий, В. П. (2003). *Фітомеліорація (Phytomelioration)*. Львів: Світ.
- Кучерявий, В. П. (2011). *Урбоекологія, фітомеліорація: витоки і шляхи розвитку (Urboecology, phytomelioration: origins and ways of development)*. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 2, 25-30.
- Кучерявий, В. А., Дудин, Р. Б., Ковальчук, Н. П., & Пилат, О. С. (2004). *Дерева, чагарники, ліани в ландшафтній архітектурі (Trees, shrubs, vines in landscape architecture)*. Львів: Кварт.
- Кучерявий, В. П., Данилик, І. М., Данилик, Р. М., Скробала, В. М., & Пархуць, Л. В. (2011). *Урбанізація рослинного покриву Карпатського села Бусовисько (середні Бескиди) (Urbanization of vegetational cover in Busovysko Carpathian village (Middle Beskyds))*. *Науковий вісник НЛТУ України*, 21(16), 39-48.
- Кучерявий, В. П., & Кучерявий, В. С. (2020). *Озеленення населених місць (Landscaping of populated areas)*. Львів: Видавництво «Новий Світ-2000».
- Миклуш, С. І., & Миклуш, Ю. С. (2010). *Підходи до оцінки рекреаційних рівнинних букових лісів (Approaches of assessment of recreational plane beech forests)*. *Науковий вісник НЛТУ України*, 20(9), 56-60.

**MODELING OF GRAIN AND SEED SHAPE TO SUBSTANTIATE OF SEED  
CLEANER SIEVE PARAMETERS****I. Dudarev\*, S. Prybysh***Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine***ABSTRACT**

*Seed cleaning is the mandatory technological operation of post-harvest processing of agricultural crops. During seed cleaning, trash, seed impurities and other components of the seed mass are separated from the grain/seeds of the main crop. The effective course of seed cleaning depends on the technological parameters of the seed mass and the parameters and mode of operation of the cleaner. Indicators characterizing the efficiency of the seed cleaner are productivity, indicator of seed separation, indicator of seed loss and indicator of seed damage. The technical indicators of the seed cleaner include the specific metal capacity and energy intensity of the seed cleaning process, as well as the degree of sieve surface utilization. The technological indicators of the seed mass are the moisture content and the ratio of mass components. The sieve is the working surface of the seed cleaner, which is characterized, among other things, by the shape and size of the holes and their position. In turn, the choice of the shape and size of the sieve holes depends on the shape and size of the components of the grain mass. It is important to determine the shape and size of the grains/seeds in order to justify the sieve parameters. This paper analyses known methods for the quantitative determination of grain/seed shape. The studies were carried out using a digital microscope and computer software for plotting and area determination of projection images and patterns of grains/seeds. The resulting mathematical models, which include the parametric equations of the ellipse and the modified super formula, describe the shape of the projections of linseed, wheat and maize, buckwheat and soya bean seeds. These mathematical models can be used in the design of sieve work surfaces of seed cleaner. A scheme and equation are also proposed for the determination of a complex indicator, which makes it possible to evaluate the design of any seed cleaner in comparison with other seed cleaners. A comprehensive indicator can be used to evaluate the design of any machines and equipment, as it takes into account all the parameters that affect the efficiency of their operation, and compare them with the best values of these parameters.*

**Key words:**

seed cleaning process,  
seed shape,  
seed model,  
shape of sieve hole,  
sieve cleaner

**Article history:**

Received 17.05.2023

Accepted 23.06.2023

**\*Corresponding author:**

i\_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1066

**To cite this article:**

Dudarev, I., & Prybysh, S. (2023). Modeling of grain and seed shape to substantiate of seed cleaner sieve parameters. *Agricultural Machines*, 49, 124-133. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1066>



УДК 621.928:001.891.573

**МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ЗЕРНА ТА НАСІННЯ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕШЕТА СЕПАРАТОРА****І.М. Дударев\*, С.Ю. Прибиш***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Обов'язковою технологічною операцією післязбирального оброблення сільськогосподарських культур є сепарування. Під час сепарування відбувається відокремлення від зерна/насіння основної культури сміттєвих та зернових домішок, а також інших складових зернової маси. Ефективний перебіг сепарування залежить від технологічних показників зернової маси та параметрів і режиму роботи сепаратора. Робочою поверхнею решітного сепаратора зернової маси є решето, яке, з-поміж інших параметрів, характеризується формою та розмірами отворів, а також їх розташуванням. Своєю чергою, вибір форми та розмірів отворів решета залежить від форми та розмірів складових зернової маси. Отже, важливим для обґрунтування параметрів решета є визначення форми та розмірів зернівок/насінин. У статті проаналізовані відомі методи кількісного визначення форми зернівок/насінин. Дослідження проводилися із використанням цифрового мікроскопа та комп'ютерного програмного забезпечення для побудови графіків, а також визначення площі зображень проєкцій зернівок/насінин та їх моделей. Отримані математичні моделі, що містять записані в параметричній формі рівняння еліпса та модифікованої суперформули, дозволяють описати форму проєкцій насіння льону-довгунця, зернівок пшениці та кукурудзи, плодів гречки та сої. Ці математичні моделі можуть бути використані під час проєктування решітчастих робочих поверхонь сепараторів зернової маси. Також запропоновані схема та вираз для визначення комплексного показника, який дозволяє оцінити конструкцію будь-якого решітного сепаратора порівняно з іншими сепараторами. Комплексний показник можна використовувати для оцінювання конструкцій будь-яких машин та обладнання, оскільки він дозволяє урахувати всі параметри, які впливають на ефективність їх функціонування, та порівняти їх з найкращими (базовими) значеннями цих параметрів.

**Ключові слова:**

сепарування зерна,  
форма зерна,  
модель зерна,  
форма отворів решета,  
решітний сепаратор

**Історія публікації:**

Отримано 17.05.2023

Затверджено 23.06.2023

**\*Автор для листування:**

i\_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1066

**Цитувати цю статтю:**

Дударев, І. М., & Прибиш, С. Ю. (2023). Моделювання форми зерна та насіння для обґрунтування параметрів решета сепаратора. *Сільськогосподарські машини*, 49, 124-133. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1066>



**СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

При оцінюванні конструкції сепаратора зернової маси, що має решітчасті робочі поверхні, необхідно урахувати технологічні показники зернової маси, за яких є можливим ефективне сепарування, технічні показники сепаратора та показники, що характеризують ефективність його роботи. Роботу сепаратора характеризують продуктивність  $P_{11}$ , ступінь відокремлення домішок (зернових, сміттєвих)  $P_{12}$ , ступінь втрат зерна основної культури  $P_{13}$  та ступінь пошкодження зерна  $P_{14}$ . Поміж технічних показників сепаратора є питома металомісткість  $P_{21}$  і енергоємність  $P_{22}$  процесу сепарування, а також ступінь використання поверхні решета  $P_{23}$ .

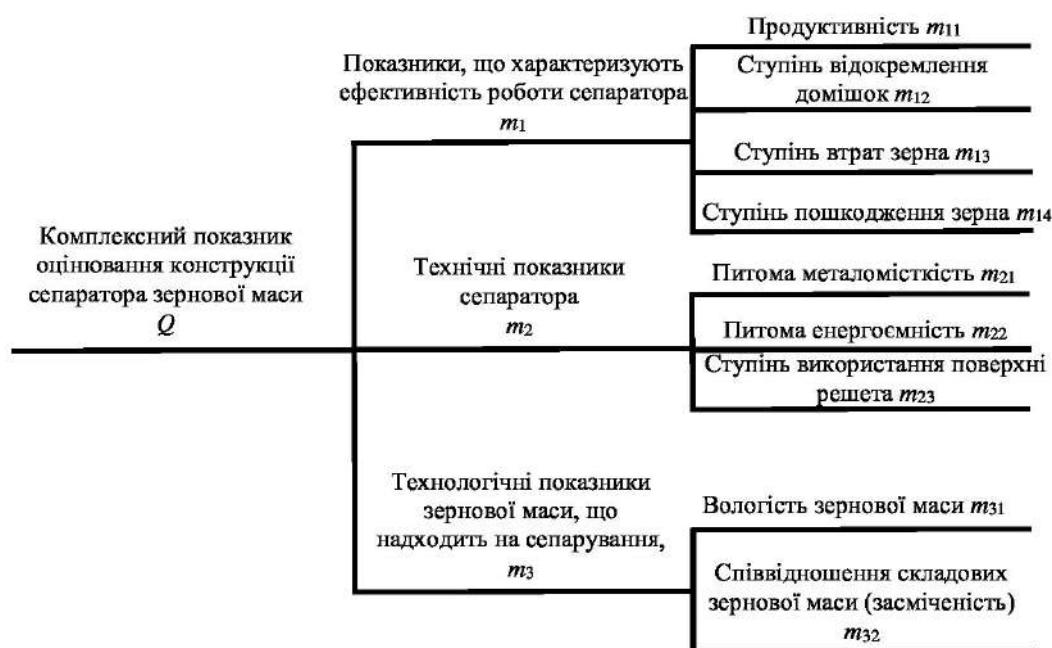
Технологічними показниками зернової маси, яка надходить на сепарування, є вологість  $P_{31}$  та співвідношення складових маси (засміченість)  $P_{32}$ . Важливими також для вибору решіт сепаратора та режиму його роботи є фізико-механічні властивості, розмір та форма складових зернової маси (Фоминих & Чумаков, 2010). Плоске решето зернового сепаратора характеризують конструкція, форма, просторове розташування, спосіб руху, а також форма, розмір та розташування отворів (Ольховський & Дударев, 2021). Оцінити конструкцію решітного сепаратора

зернової маси можна за комплексним показником, який обчислюється відповідно до схеми на **рис. 1**:

$$Q = m_1 \left( \frac{m_{11}P_{11}}{P_{\delta 11}} + \frac{m_{12}P_{12}}{P_{\delta 12}} + \frac{m_{13}P_{13}}{P_{13}} + \frac{m_{14}P_{14}}{P_{14}} \right) + m_2 \left( \frac{m_{21}P_{\delta 21}}{P_{21}} + \frac{m_{22}P_{22}}{P_{22}} + \frac{m_{23}P_{23}}{P_{\delta 23}} \right) + m_3 \left( \frac{m_{31}P_{\delta 31}}{P_{31}} + \frac{m_{32}P_{\delta 32}}{P_{32}} \right), \quad (1)$$

де  $Q$  – комплексний показник для оцінювання конструкції решітного сепаратора;  $m_i, m_{ij}$  – коефіцієнти вагомості показників;  $P_{ij}$  – фактичні значення показників;  $P_{\delta ij}$  – базові значення показників (рекомендовані значення або ж значення цих показників найкращих конструкцій решітних сепараторів).

У виразі (1) містяться базові значення показників: продуктивність  $P_{\delta 11}$ ; ступінь відокремлення домішок (зернових, сміттєвих)  $P_{\delta 12}$ ; ступінь втрат зерна основної культури  $P_{\delta 13}$ ; ступінь пошкодження зерна  $P_{\delta 14}$ ; питома металомісткість сепарування  $P_{\delta 21}$ ; питома енергоємність сепарування  $P_{22}$ ; ступінь використання поверхні решета  $P_{\delta 23}$ ; вологість зернової маси  $P_{\delta 31}$ ; співвідношення складових зернової маси (засміченість)  $P_{\delta 32}$ .



**Рис. 1** – Схема до визначення комплексного показника  $Q$  оцінювання конструкції решітного сепаратора

У виразі (1) біля кожного із показників міститься коефіцієнт його вагомості ( $m_i, m_{ij}$ ). Коефіцієнти вагомості показників визначають шляхом опитування експертів (Дударев, 2022):

$$\left. \begin{aligned} m_1 + m_2 + m_3 &= 1; \\ m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14} &= 1; \\ m_{21} + m_{22} + m_{23} &= 1; \\ m_{31} + m_{32} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Якщо збільшення фактичного значення показника  $P_{ij}$  позитивно впливає на оцінку конструкції сепаратора, то цей показник записується в чисельнику, а відповідне базове значення показника  $P_{\delta ij}$  – в знаменнику. І, навпаки, якщо збільшення фактичного значення показника  $P_{ij}$  негативно впливає на оцінку конструкції сепаратора, то цей показник записується в знаменнику, а відповідне базове значення показник  $P_{\delta ij}$  – в чисельнику.

Що більше значення комплексного показника  $Q$  порівняно зі значеннями цього показника для конструкцій-аналогів, то вище оцінено конструкцію сепаратора.

У виразі (1) вплив конструктивних особливостей решета та режиму його роботи на оцінку сепаратора ураховано через показники  $P_{11}, P_{12}, P_{13}$  та  $P_{14}$ . Однак, необхідно зауважити, що вибір форми та розмірів отворів решета для забезпечення ефективного перебігу сепарування залежить від урахування форми і розмірів складових зернової маси, яку необхідно розділити на решеті. Якщо розміри насінини (довжину, ширину і товщину) можна визначити шляхом прямого вимірювання, то кількісне визначення форми насінини чи зернівки ускладнене.

Відомі різні методи кількісного визначення форми зернівок/насінин різних сільськогосподарських культур. Найпростіший метод – це виміряти довжину й ширину зернівки/насінини та за їх співвідношенням обчислити індекс ексцентриситету, що характеризує форму зернівки чи насінини (Cervantes et al., 2016):

$$I_{екс.} = \frac{l}{s}, \quad (3)$$

де  $I_{екс.}$  – індекс ексцентриситету;  $l$  – довжина

зернівки/насінини, мм;  $s$  – ширина зернівки/насінини, мм.

Форму зернівки/насінини характеризують індексом площинності (Cervantes et al., 2016):

$$I_{пл.} = \frac{(l+s)}{2h}, \quad (4)$$

де  $I_{пл.}$  – індекс площинності (форми);  $l$  – довжина зернівки/насінини, мм;  $s$  – ширина зернівки/насінини, мм;  $h$  – товщина зернівки/насінини, мм.

Ще одним показником, що характеризує форму зернівки або насінини, є форм-фактор (Cervantes et al., 2012):

$$I_{ф.ф.} = \frac{4\pi S}{P^2}, \quad (5)$$

де  $I_{ф.ф.}$  – форм-фактор;  $S$  – площа поверхні зернівки/насінини, мм<sup>2</sup>;  $P$  – периметр зернівки/насінини, мм.

Індекс округлості зернівки або насінини (Juan et al., 2022):

$$I_{ок.} = \frac{4S}{\pi l^2}, \quad (6)$$

де  $I_{ок.}$  – індекс округлості;  $S$  – площа поверхні зернівки/насінини, мм<sup>2</sup>;  $l$  – більша вісь зернівки/насінини (довжина), мм.

Довжина, ширина, площа та периметр зернівки чи насінини не в усіх випадках дозволяють з необхідною точністю описати їх форму, оскільки зернівки/насінини різних культур, що мають дуже схожі розміри за всіма цими параметрами, можуть суттєво відрізнятися за формою (Cervantes et al., 2019). Відповідно, індекси, які обчислені за цими характеристиками, не дозволяють описати форму зернівки/насінини.

Для опису форми зернівки/насінини використовується аналіз їх цифрових зображень (DIA – Digital Image Analysis) (Williams et al., 2012). Зернівки та насінини багатьох видів рослин нагадують геометричні фігури. Відповідно, плоске зображення зерна/насіння можна описати через подібність до плоских геометричних фігур. Отже, цей метод також може бути використано для кількісного визначення форми зернівки або насінини.

Форму зернівки/насінини порівнюють з геометричними моделями кардіоїди, еліпса, овалу, спіралі Фібоначчі, лінзи тощо (Cervantes & Martín Gómez, 2019). Для опису форми симетричних зернівок чи насінин використовується два типи моделей (Martín-Gómez et al., 2021): супереліпс та комбінація двох напівеліпсів. Супереліпс описується рівнянням:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^p + \left|\frac{y}{b}\right|^p = 1, \quad (7)$$

де  $a$ ,  $b$  – півосі супереліпса;  $p$  – показник степеня ( $p > 0$ );  $x$ ,  $y$  – координати точок кривої.

Друга група моделей отримана за допомогою рівняння еліпса з півосями 1 та  $1/b$ , де  $b > 0$  (Martín-Gómez et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} - by\right)\left(\sqrt{1-x^2} + by\right) = 0. \quad (8)$$

Опис форми зернівки/насінини у вигляді краплі води отримують шляхом модифікації рівняння (8) (Cervantes et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} + by\right) \times \left(\sqrt{1-x^2} + \frac{a}{50x^2 + c} - by\right) = 0, \quad (9)$$

де  $a = b = 1$ ,  $c = 2$ .

Одночасні модифікації в обох членах рівняння (8) дозволяють описати форму у вигляді серця (Cervantes et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} - \frac{a}{54x^2 + 9|x| + 3} + y\right) \times \left(\sqrt{1-x^2} + \frac{b}{54x^2 + 9|x| + 3} - y\right) = 0, \quad (10)$$

де  $a = 1/2$ ;  $b = 1/3$  (збільшення  $a$  – зменшує розмір нижньої частини фігури; збільшення  $b$  – зменшує наддзьбок фігури).

Альтернативою канонічним геометричним фігурам, які використовуються як моделі для кількісного визначення форми зернівки чи насінини, можуть бути безперервні замкнуті

криві, що описані рівняннями Фур'є (Cervantes et al., 2022).

Для кількісного оцінювання форми зернівки чи насінини використовується також метод порівняння двомірного зображення зернівки чи насінини з геометричною фігурою, за результатами якого обчислюється індекс  $J$  (Gutiérrez del Pozo et al., 2020):

$$J = \frac{S}{T} \cdot 100, \quad (11)$$

де  $S$  – площа плоскої фігури, що накладається на зображення зернівки чи насінини,  $\text{мм}^2$ ;  $T$  – площа зображення зернівки чи насінини,  $\text{мм}^2$ .

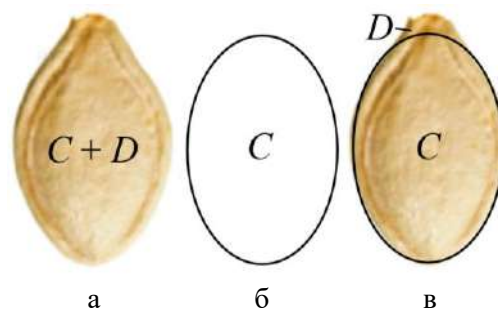
Індекс  $J$  вказує на відсоток подібності між плоским зображенням зернівки/насінини і його геометричною моделлю. Відповідно, цей індекс може змінюватися в межах 1–100 та є мірою форми, а не розміру.

У науковій роботі (Martín-Gómez et al., 2020) пропонується вираз (11) записати у вигляді (рис. 2):

$$J = \frac{C}{C+D} \cdot 100, \quad (12)$$

де  $C$  – площа області, що спільна для моделі та зображення зернівки/насінини,  $\text{мм}^2$ ;  $D$  – площа області, яка не є спільною для моделі та зображення зернівки/насінини,  $\text{мм}^2$ .

Необхідно зауважити, що форму плоскої геометричної фігури можна вважати подібною до плоского зображення зернівки чи насінини, якщо  $J > 90$ .



**Рис. 2** – Схеми до визначення індексу  $J$ :  
а – плоске зображення насінини гарбуза;  
б – модель насінини гарбуза (овал);  
в – накладання моделі на зображення насінини гарбуза

Актуальними є подальші дослідження, що дозволять отримати математичні моделі, які описують проєкції зернівки або насінини сільськогосподарських культур, що можуть бути використані під час обґрунтування розмірів та форми отворів решіт сепараторів зернової маси.

**Мета дослідження** – моделювання форми зерна та насіння для обґрунтування параметрів решета сепаратора зернової маси.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Двомірні зображення насінини льону-довгунця, зернівок кукурудзи та пшениці, плодів гречки і сої отримали із використанням цифрового мікроскопу Bresser Biolux LCD 5MP (рис. 3).



Рис. 3 – Цифровий мікроскоп Bresser Biolux LCD 5MP

Моделювання форми проєкцій зернівок або насінин сільськогосподарських культур проходило із використанням математичних методів. Побудову плоских кривих, що описують форму проєкцій зернівок/насінин, за отриманими математичними моделями здійснювали у системі комп'ютерної алгебри Mathcad 14. Для оброблення плоских кривих, що побудовані в Mathcad 14, використовували комп'ютерну програму AutoCAD 2007. Створені моделі (плоскі криві) форми дорсальної, латеральної та/або вентральної

проєкцій зернівок/насінин порівнювалися із насінням льону-довгунця, зернівками пшениці та кукурудзи, плодами гречки та сої. Для кількісного оцінювання подібності форми моделі до двомірного зображення зернівки чи насінини обчислювали індекс  $J$  за виразом (11). Якщо  $J > 90$ , то вважалось, що модель подібна за формою до проєкції зернівки/насінини. Площа  $T$  двомірних зображень зернівки чи насінини та площа  $S$  плоских фігур, що обмежені кривими, які одержані за рівняннями моделей, визначалися шляхом аналізування зображень у форматі PNG у комп'ютерній програмі для оброблення зображень ImageJ (рис. 4).

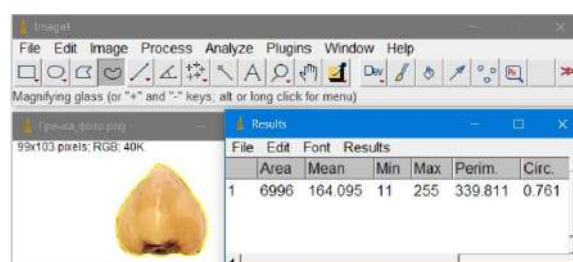


Рис. 4 – Робоче вікно комп'ютерної програми ImageJ

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Зернівки і насінини більшості культур в дорсальній, латеральній та вентральній проєкціях мають різну форму й розміри. Для опису форми насіння льону-довгунця, гречки та кукурудзи використано суперформулу плоскої кривої супереліпса Й. Джиліса:

$$r(\varphi) = \left[ \frac{\left| \cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_2}}{a} + \frac{\left| \sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}}, \quad (13)$$

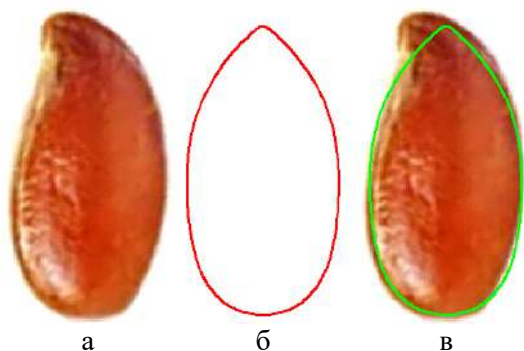
де  $r$  – радіус у полярній системі координат;  $\varphi$  – кут у полярній системі координат;  $m$  – параметр, що характеризує число фрагментів, які повторюються;  $n_1, n_2, n_3$  – параметри, що визначають форму;  $a, b$  – габарити (величина півосей).

Форму дорсальної проєкції насіння льону-довгунця (рис. 5) можна описати поданою в параметричній формі суперформулою (13):

$$x(\varphi) = \left[ \left( \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 3 \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 3 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[ \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (14)$$

де  $m = 3; n_1 = 35; n_2 = 17; n_3 = 17; a = 1; b = 1$ .



**Рис. 5** – Схеми до визначення індексу  $J$  для насінини льону-довгунця:

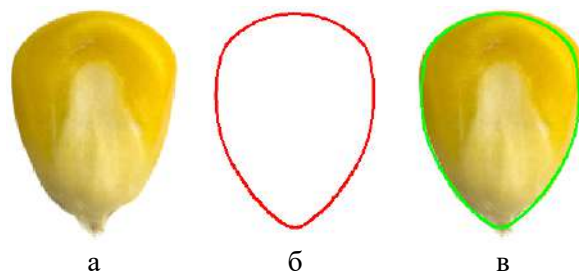
а – плоске зображення насінини льону-довгунця; б – модель насінини; в – накладання моделі на зображення насінини

Форму дорсальної проєкції зернівки кукурудзи (**рис. 6**) можна описати поданою в параметричній формі модифікованою суперформулою (13):

$$x(\varphi) = \left[ \left( \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 0,7 \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 0,7 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[ \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (15)$$

де  $x, y$  – координати кривої вздовж осей  $x$  та  $y$ ;  $m = 3; n_1 = 31; n_2 = 20; n_3 = 20; a = 1; b = 1$ .



**Рис. 6** – Схеми до визначення індексу  $J$  для зернівки кукурудзи:

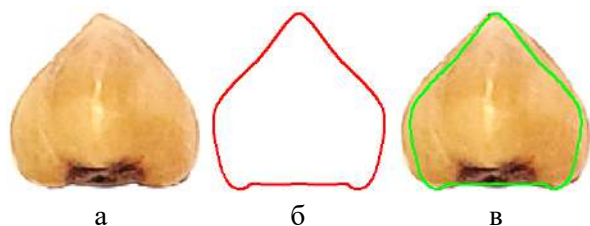
а – плоске зображення зернівки кукурудзи; б – модель зернівки; в – накладання моделі на зображення зернівки

Форму дорсальної проєкції плода гречки (тригранного горішка) (**рис. 7**) можна описати модифікованою суперформулою, що подана в параметричній формі (13):

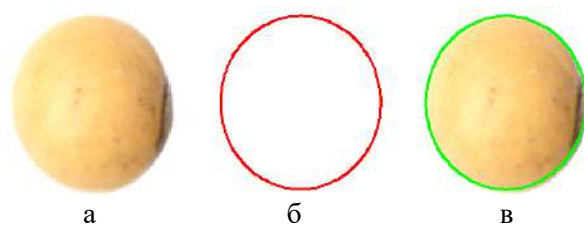
$$x(\varphi) = \left\{ \left[ \left( \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 1,4 \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 1,4 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} + 1,2 \right\} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[ \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (16)$$

де  $m = 3; n_1 = 4,6; n_2 = 10; n_3 = 10; a = 1; b = 1$ .



**Рис. 7** – Схеми до визначення індексу  $J$  для плода гречки:  
а – плоске зображення плода гречки;  
б – модель плода; в – накладання моделі на зображення плода



**Рис. 8** – Схеми до визначення індексу  $J$  для плода сої:  
а – плоске зображення плода сої;  
б – модель плода; в – накладання моделі на зображення плода

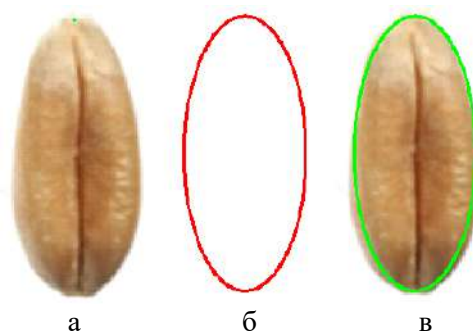
Вирази (14)–(16) дозволяють змоделювати лише форму зернівки/насінини без урахування її розмірів, тому для приведення моделі до розмірів насінини необхідно використовувати коефіцієнти масштабування, однакові для осей  $x$  та  $y$ .

Для опису форми латеральної проекції плода (боба) сої (рис. 8) використано рівняння еліпса в параметричній формі:

$$\left. \begin{aligned} x(\varphi) &= a \cos(\varphi); \\ y(\varphi) &= b \sin(\varphi); \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

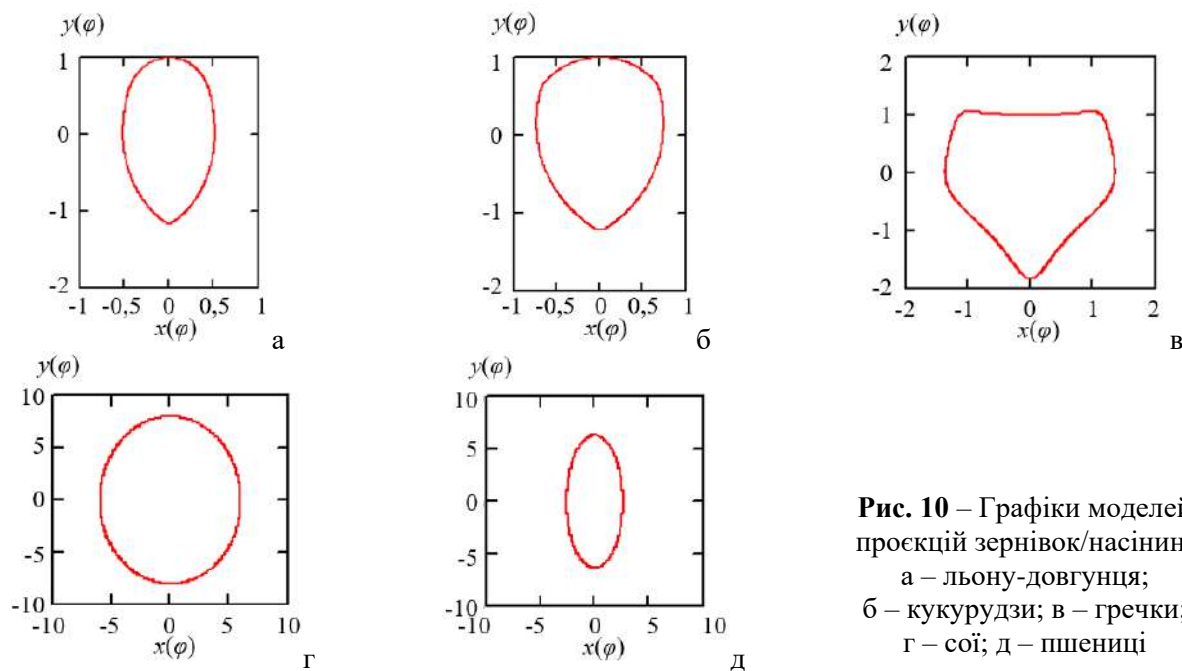
де  $a, b$  – осі еліпса (ширина та довжина плода).

Для опису форми дорсальної/вентральної проекцій зернівки пшениці (рис. 9) можна також використати рівняння еліпса в параметричній формі (17).



**Рис. 9** – Схеми до визначення індексу  $J$  для зернівки пшениці:  
а – плоске зображення зернівки пшениці;  
б – модель зернівки; в – накладання моделі на зображення зернівки

Моделі зернівок та насінин, що зображені на рис. 5–9, побудовані із використанням програми Mathcad 14 (рис. 10).



**Рис. 10** – Графіки моделей проєкцій зернівок/насінин:  
а – льону-довгунця;  
б – кукурудзи; в – гречки;  
г – сої; д – пшениці



Результати обчислення індексу  $J$  за виразом (11) для моделей насінини льону-довгунця, зернівок кукурудзи та пшениці, плодів гречки та сої подані в **таблиці**. Оскільки значення індексу  $J > 90\%$  для моделей зернівок та насінин досліджених культур, то запропоновані моделі проєкцій можна вважати подібними до двомірних зображень зернівок та насінин цих культур.

**Таблиця** – Результати обчислення індексу  $J$  для моделей зернівок та насінин

Зернівка чи насінини сільськогосподарських культур	Значення індексу $J$ , %
1	2
Льон-довгунець	93,0
Пшениця	95,3
Гречка	90,1
Кукурудза	96,3
Соя	99,4

### ВИСНОВКИ

Ефективне сепарування насіння та зерна сільськогосподарських культур на решітних сепараторах можливе у випадку правильного вибору решіт та режимів сепарування із урахуванням властивостей зернової маси, що надходить на сепарування, та її складових. Поміж характеристик складових зернової маси важливою є форма зернівок та насінин, з урахуванням якої вибираються решета з необхідною формою та розміром отворів. Отже, важливо математично описати форму зернівок/насінин, що дозволить обґрунтувати раціональну форму та розміри отворів решіт сепаратора і, відповідно, зробити процес сепарування більш ефективним. Отримані математичні моделі, що містять записані в параметричній формі рівняння еліпса та модифікованої суперформули, дозволяють описати форму проєкцій насіння льону-довгунця, зернівок пшениці та кукурудзи, плодів гречки та сої. Ці математичні моделі можуть бути використані під час проєктування решітчастих робочих поверхонь сепараторів зернової маси.

Також запропоновані схема та вираз для визначення комплексного показника, який дозволяє оцінити конструкцію будь-якого

решітного сепаратора порівняно з іншими сепараторами. Комплексний показник можна використовувати для оцінювання конструкцій будь-яких машин та обладнання, оскільки він дозволяє урахувати всі параметри, які впливають на ефективність їх функціонування, та порівняти їх з найкращими (базовими) значеннями цих параметрів.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Cervantes, E., Martín, J. J., Chan, P. K., Gresshoff, P. M., & Tocino, Á. (2012). Seed shape in model legumes: Approximation by a cardioid reveals differences in ethylene insensitive mutants of *Lotus japonicus* and *Medicago truncatula*. *Journal of Plant Physiology*, 169(14), 1359-1365. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.05.019>
- Cervantes, E., Martín, J. J., & Saadaoui, E. (2016). Updated methods for seed shape analysis. *Scientifica*, 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2016/5691825>
- Cervantes, E., & Martín Gómez, J. J. (2019). Seed shape description and quantification by comparison with geometric models. *Horticulturae*, 5, 60. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5030060>
- Cervantes, E., Martín Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., & Silva Dias, L. (2019). An Angiosperm Species dataset reveals relationships between seed size and two-dimensional shape. *Horticulturae*, 5, 71. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040071>
- Cervantes, E., Martín-Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., & Tocino, Á. (2021). Seed geometry in the Vitaceae. *Plants*, 10, 1695. <https://doi.org/10.3390/plants10081695>
- Cervantes, E., Rodríguez-Lorenzo, J. L., Diego Gutiérrez del Pozo, D., Martín-Gómez, J. J., Janousek, B., Tocino, Á., & Juan, A. (2022). Seed Silhouettes as geometric objects: New applications of Elliptic Fourier Transform to seed morphology. *Horticulturae*, 8, 974. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100974>
- Gutiérrez del Pozo, D., Martín-Gómez, J. J., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2020). Seed geometry in the Arecaceae. *Horticulturae*, 6, 64. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040064>
- Juan, A., Martín-Gómez, J. J., Rodríguez-Lorenzo, J. L., Janoušek, B., & Cervantes, E. (2022). New techniques for seed shape description in silene species. *Taxonomy*, 2, 1-19. <https://doi.org/10.3390/taxonomy2010001>
- Martín-Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., Uchescu, M., Bacchetta, G., Cabello Sáenz de Santamaría, F., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2020). Seed morphology in the Vitaceae based on geometric models. *Agronomy*, 10, 739. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050739>



- Martín-Gómez, J. J., del Pozo, D. G., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2021). Geometric models for seed shape description and quantification in the cactaceae. *Plants*, 10, 2546. <https://doi.org/10.3390/plants10112546>
- Williams, K., Munkvold, J., & Sorrells, M. (2012). Comparison of digital image analysis using elliptic Fourier descriptors and major dimensions to phenotype seed shape in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 190(1), 99-116. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0783-0>
- Дударев, І. М. (2022). Алгоритм оцінювання придатності рослинної сировини для перероблення за певною технологією (*Algorithm for assessing the suitability of plant raw materials for processing according to a certain technology*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 100-109. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.888>
- Ольховський, В. О., & Дударев, І. М. (2021). Способи сепарування та сепаратори зернової маси (*Separation methods and separators of grain mass*). *Сільськогосподарські машини*, 47, 102-112. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.655>
- Фоминых, А. В., & Чумаков, В. Г. (2010). Алгоритм расчета процесса сепарации на решетных устройствах (*Algorithm for calculating the separation process on screen devices*). *Аграрный вестник Урала*, 7(73), 77-79.

## FLAX STEM QUALITY ASSESSMENT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

O. Yaheliuk, V. Didukh, S. Yaheliuk\*

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---



### ABSTRACT

*As a result of the war, the economy of Ukraine created conditions that require innovative solutions in agricultural production. For example, there was an urgent need to use the cultivated areas of the northern and western parts of Ukraine for crops that were traditionally grown only in the southern regions of the country. Modernization and implementation of innovative technologies in the agro-industrial complex will contribute to the successful and rapid recovery of the economy of Ukraine. Unmanned aerial vehicles are an integral part of modern technologies that can be used in agriculture. It is proposed to use unmanned aerial vehicles to evaluate the quality indicators of the stem of linseed and fibre flax. Flax is of great practical value as its crop is used extensively in the food and non-food industries. The amount of flax grown in the world is increasing every year. The technique of using unmanned aerial vehicles can be based on the monitoring and analysis of the colour characteristics of the flax stem obtained with the help of photographic equipment. In order to implement the method of assessing quality indicators of flax with the help of unmanned aerial vehicles, it is necessary to create calibration tables of colour characteristics of plants depending on the ripening phase, length and moisture content of stems, as well as fibre content. The application of the method of flax stem quality assessment with the use of unmanned aerial vehicles allows to: obtain data for detailed on-line monitoring of the condition of linseed and fibre flax crops; select with high accuracy a rational technology of flax processing taking into account the qualitative and quantitative indicators of the flax stem and achieve high efficiency of using all the biological potential of this crop. The proposed method of crop condition assessment is universal and can be used by agro-industrial enterprises and farms for research of other agricultural crops.*

#### **Key words:**

flax,  
unmanned aerial vehicle,  
assessment of flax quality,  
flax stem,  
progressive technologies in  
agriculture

#### **Article history:**

Received 18.05.2023

Accepted 24.06.2023

#### **\*Corresponding author:**

cler2010@gmail.com

---

DOI: 10.36910/acm.vi49.1068

#### **To cite this article:**

Yaheliuk, O., Didukh, V., & Yaheliuk, S. (2023). Flax stem quality assessment using unmanned aerial vehicles. *Agricultural Machines*, 49, 134-140. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1068>

УДК 631.37:629.7.014

**ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТЕБЛОСТОЮ ЛЬОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ  
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ****О.О. Ягелюк, В.Ф. Дідух, С.В. Ягелюк\****Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Внаслідок війни в економіці України сформувалися умови, які потребують інноваційних рішень в сільськогосподарському виробництві. Модернізація та впровадження інноваційних технологій в агропромисловому комплексі сприятиме успішному та швидкому відновленню економіки України. Невід'ємною частиною сучасних технологій, що можуть бути використані у сільському господарстві, є безпілотні літальні апарати. Запропоновано використовувати безпілотні літальні апарати для оцінювання показників якості стеблостою льону олійного та льону-довгуця. Льон має велику практичну цінність завдяки комплексному використанню його урожаю у продовольчій та непродовольчій галузях промисловості. Обсяги вирощування льону у світі щорічно зростають. Методика використання безпілотних літальних апаратів може бути заснована на моніторингу та аналізі колірних характеристик стеблостою льону, що отримані за допомогою фото-обладнання. Для впровадження методики оцінювання показників якості стеблостою льону за допомогою безпілотних літальних апаратів необхідно створити калібрувальні таблиці колірних характеристик рослин залежно від фази дозрівання, довжини та вологості стебел, а також вмісту волокна. Застосування методу оцінювання якості стеблостою льону з використанням безпілотних літальних апаратів дозволяє: отримувати дані детального моніторингу стану посівів льону олійного та льону-довгуця в режимі *on-line*; з високою точністю вибирати раціональну технологію перероблення льону з урахуванням якісно-кількісних показників стеблостою та досягати високої ефективності використання всього біологічного потенціалу цієї культури. Запропонований метод оцінювання стану посівів є універсальним та може використовуватися агропромисловими підприємствами та фермерськими господарствами для дослідження посівів інших сільськогосподарських культур.

**Ключові слова:**

льон,  
безпілотний літальний апарат,  
оцінювання якості льону,  
стебла льону,  
прогресивні технології в  
сільському господарстві

**Історія публікації:**

Отримано 18.05.2023

Затверджено 24.06.2023

**\*Автор для листування:**

cler2010@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi49.1068

**Цитувати цю статтю:**

Ягелюк, О. О., Дідух, В. Ф., & Ягелюк, С. В. (2023). Оцінювання якості стеблостою льону з використанням безпілотних літальних апаратів. *Сільськогосподарські машини*, 49, 134-140. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1068>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В економіці України сформувалися умови, які потребують інноваційних рішень в сільськогосподарському виробництві. Експорт продовольства з України за даними (*Trade Map, n.d*) у травні 2023 року склав 1,67 млрд дол США, що майже на третину менший ніж показники минулого року. Внаслідок війни та екологічної катастрофи з'явилася гостра необхідність використання посівних площ північної та західної частин України для культур, що традиційно вирощувалися лише в південних областях країни. Відповідно, відновлення економіки України потребує значної модернізації та запровадження інноваційних технологій в агровиробництві.

Однією з сільськогосподарських культур, що має велику практичну цінність завдяки комплексному використанню всього урожаю у продовольчій та непродовольчій галузях промисловості, є льон (*Ягелюк & Дідух, 2021*). За статистичними даними (*FAOSTAT, n.d.*) обсяги виробництва льону олійного у світі щорічно зростають. Країнами, що на значних площах вирощують льон олійний, є Індія та Китай. Однак, основними виробниками цієї культури залишаються США та Канада. Повільно, але зростає виробництво льону-довгунця. Основним постачальником у світі найбільш високоякісного волокна з льону-довгунця залишається Бельгія.

Кліматичні умови західних областей України є сприятливими для вирощування льону-довгунця. Результати дослідження технологічних операцій збирання льону та техніки для них, а також визначення факторів, які впливають на формування якісного волокна, подані в наукових працях (*Юхимчук, 1998; Налобіна, 2008; Хайліс та ін., 2013*). Льон олійний є відносно новою культурою для північних та західних областей України. Однак, умови, які склалися на сьогодні, сприяють значному зростанню виробництва цієї культури в західному регіоні України. Дослідженню властивостей, показників якості та технологій перероблення льону олійного присвячені наукові праці (*Сай та ін., 2009; Dudarev & Say, 2020; Yaheliuk et al., 2020*). З огляду на результати відомих досліджень можна зробити висновок, що льон-довгунець та льон олійний, незважаючи на відмінності, мають схожі технологічні характеристики та

властивості. Показники якості стеблостою льону олійного та льону-довгунця визначають подальший напрям їх використання.

У науковій праці (*Ягелюк & Дідух, 2020*) подано концептуальну модель перероблення льону залежно від фази стиглості, довжини та вологості стебел, а також масової частки лубу. Використання виробниками класифікаційних ознак стеблостою льону має випадковий характер та не враховується під час збирання урожаю. Статистичні дані щодо стану стеблостою льону попередніх років не систематизуються та не обробляються. Це спричиняє втрати урожаю льону та шкодить навколишньому середовищу. Постійний та детальний моніторинг вирощування цієї культури – це трудомісткий процес, що вимагає залучення кваліфікованих працівників та тривалий у часі, особливо, для господарств, які мають великі площі та вирощують різні культури.

Уже тривалий час можливості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) використовуються військовими. Сучасні високотехнологічні БПЛА мають широкий спектр можливостей, які дозволяють їх використовувати у різних галузях виробництва, зокрема, у сільському господарстві (*Edan et al., 2009*). Використання БПЛА дозволяє в режимі реального часу спостерігати за полями, садками, водоймами, отримувати просторові дані, виявляти проблеми та вчасно на них реагувати (*Yinka-Banjo & Ajayi, 2020*).

Якщо БПЛА використовувати для моделі технологій перероблення льону різних видів, що обґрунтована в науковій праці (*Ягелюк & Дідух, 2020*), то це дозволить вчасно та з високою точністю оцінити показники якості стеблостою льону і, відповідно, встановити напрями подальшого використання урожаю.

За даними (*УКРСТАТ, n.d*) в Україні до 2022 року було 45,5 тис сільськогосподарських підприємств. Але лише 10% підприємств використовували прогресивні технології. Тому дослідження, що передбачають визначення ефективних напрямів використання БПЛА у сільськогосподарському виробництві, зокрема під час оцінювання якості стеблостою льону, є актуальними.

**Мета дослідження** – обґрунтувати методику використання БПЛА для оцінювання якості сільськогосподарських культур.

**МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ**

Для отримання урожаю льнопродукції необхідної якості важливо враховувати особливості вирощування льону.

Виокремлюють кілька фаз росту льону. Фаза сходів льону (рис.) – цей період характеризується появою сім'ядольних листків на поверхні землі на 4–6 день після сівби. Фаза ялинка (рис.) триває від утворення першої пари справжніх листків на рослині до періоду інтенсивного росту (15–19 днів). У цій фазі наземна частина стебла росте дуже повільно, проте швидко розвивається коренева система.

Період інтенсивного росту й фаза бутонізації (рис.) починаються за 12–16 днів до цвітіння. Цей період характеризується інтенсивним ростом стебел у висоту. Упродовж цього періоду також формуються елементарні волокна у стеблі. Фаза бутонізації розпочинається з появи перших бутонів і закінчується, коли з'являються перші квіти. Кількість елементарних волокон збільшується за всю довжину стебла, стінки волокон заповнюються целюлозою, вони групуються в пучки. Ця фаза має велике значення для формування якісного волокна. Наступна фаза – цвітіння, що триває 5–10 днів. Упродовж цієї фази стебла у висоту ростуть повільно, збільшується кількість волокон у верхній та середній частинах стебла. Після цвітіння льону формуються насіннєві коробочки.

Період досягання льону характеризується чотирма ступенями стиглості:

- зелена стиглість рослин, коли насіннєві коробочки льону повністю сформовані, мають зелений колір, проте 25–35% коробочок мають насіння недостатньо виповнене;

- рання жовта стиглість, коли насіння добре сформоване, у 65–75% жовто-зелених коробочок насіння біліє з жовтим носиком, а решта коробочок – з жовтим насінням; лише окремі коробочки зелені із зеленим насінням й бурі із коричневим; збирання урожаю льону-довгунцю в цій фазі забезпечує найвищий урожай якісного волокна;

- жовта стиглість, коли 50% жовтих коробочок мають жовте насіння, а друга половина коробочок – бурі й жовто-зелені; у цій фазі росту збирають льон насінницьких посівів;

- повна стиглість, коли всі насіннєві коробочки на рослинах бурі й сухі; насіння коричневе та сухе; дослідження показують, що збирання урожаю в цій фазі спричиняє значні втрати насіння та низьку якість волокна.

Веgetаційний період льону від появи сходів до ранньої жовтої стиглості, залежно від погодних умов й сорту, триває близько 75–90 діб. Агротехнічні заходи, які забезпечують отримання високого урожаю волокна та насіння повинні ґрунтуватися на урахуванні росту й розвитку рослин льону. На кожному етапі вирощування є свої особливості ознак – довжина, колір, вологість. Фаза стиглості, вологість та довжина стебел на момент збирання льону олійного та льону-довгунця визначають їх подальші напрями перероблення (Yaheliuk et al., 2020).

Методи аналізу, синтезу та наукової абстракції стали основою дослідження. Комплексний підхід дозволив визначити основні складові методики дослідження якості стеблової частини льону під час вирощування із використанням БПЛА.



**Рис.** – Фази росту льону:  
а – сходів; б – ялинка; в – інтенсивний ріст та бутонізація

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Товарні посіви льону олійного та льону-довгунця доцільно збирати у фазі ранньої жовтої стиглості для отримання волокна та насіння високої якості. Це можливо за сприятливих погодних умов. За умови малої довжини стебел або затяжної дощової погоди льон-довгунець можна збирати у фазі жовтої стиглості. Якщо необхідно одержати насіння високої якості, то льон можна збирати на початку фази повної стиглості.

Біологічний вид, фаза стиглості, довжина, вологість та колір стебел, вміст лубу – це ті показники, які потрібно урахувати, оскільки вони впливають на вибір технології перероблення урожаю й кінцевий якісний результат. Визначити той чи інший показник та прийняти правильне рішення щодо збирання та подальшого перероблення урожаю льону потрібно у короткий термін та в польових умовах. Потрібно відмітити, що значення окремих показників можуть відрізнятися на різних ділянках поля, що також ускладнює задачу.

У сучасних умовах найкращим рішенням для динамічного оцінювання показників якості стеблостою льону може стати застосування БПЛА. На сьогодні існує достатньо різних видів літальних апаратів з широким набором функціональних можливостей. Однак, немає єдиної класифікації, оскільки всі апарати відрізняються за конструкцією, принципом дії, набором функцій тощо.

Найбільш раціональним поділом на групи можна вважати розподіл на чотири групи, що запропоновано в працях (*Vroegindeweij et al., 2014; Sylvester, 2018*). Відповідно, існують БПЛА з вертикальним злетом (мультироторні), з нерухомим крилом, типу «бабка» або вертолёт та гібридні (**таблиця**).

Найбільш поширеними є БПЛА з вертикальним злетом. Залежно від кількості встановлених двигунів бувають трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери. Можливість вертикального злету та посадки є основною перевагою цих літальних апаратів. Мультироторні БПЛА прості в керуванні, не вимагають особливих навичок у користуванні, окремі види мають відносно низьку вартість. Недоліками цих літальних апаратів є невелика швидкість, низька витривалість та обмежений час польоту.

БПЛА із нерухомим крилом подібні до справжніх літаків. Вони можуть літати на далекі відстані, надійні, однак, не мають можливості «зависати» на одному місці та, зазвичай, потребують додаткових навичок для експлуатації.

Монороторні літальні апарати нагадують гелікоптер або «бабку». Вони мають велику маневреність, тривалість польоту та здатні «зависати» на одному місці, проте дуже ненадійні й вимагають спеціальної підготовки для керування ними.





Гібридні БПЛА конструктивно поєднують в собі мультироторні апарати та апарати із фіксованим крилом. Ці БПЛА мають можливість тривалого польоту, «зависання», транспортування невеликих вантажів, тобто є багатофункціональними. Разом з тим, із збільшенням кількості функцій, які вони здатні виконувати, зростає вартість та зменшується надійність конструкцій. Тому під час вибору БПЛА потрібно керуватися напрямом його майбутнього використання.

Для використання в агровиробництві, особливо рослинництві, БПЛА мають переваги: можливість здійснювати складні маневри, тому можуть близько наблизитися до рослин чи тварин та збирати інформацію точніше й детальніше, ніж це може людина; БПЛА не торкаються ґрунту, тому не залежать від доріг, не пошкоджують рослини; мають можливість одночасно проводити моніторинг великих площ в режимі on-line.

Подані в **таблиці** характеристики БПЛА дозволяють запропонувати можливі напрями їх використання у рослинництві, зокрема, у льонарстві:

- отримання детальної інформації щодо стану ґрунтів для ефективного планування посівів;
- забезпечення високоточного посіву різних культур;
- визначення та оцінювання показників якості та параметрів росту рослини;
- прогнозування урожаю із визначенням можливостей подальшого перероблення для максимально ефективного використання;
- моніторинг проблемних місць на полі, зокрема, визначення ділянок із низькою чи підвищеною вологістю, хворими рослинами, шкідниками;
- складання звітів щодо загального стану посівів.

Таблиця – Класифікація БПЛА

Тип БПЛА	Характеристика БПЛА	Зображення БПЛА (Drone Engr, n.d.; Wingtra. n.d.)
1	2	3
БПЛА мультироторні з вертикальним злетом	можливість вертикального злету-посадки, «зависання» над визначеною територією; тривалість польоту до 60 хв; невеликі габаритні розміри; швидкість до 50 км/год; середній опір вітру до 10 м/с; можливість розташування додаткового обладнання; кількість двигунів – 4–8; окремі види потребують додаткових навичок у керуванні	
БПЛА із нерухомим крилом	потребують додаткових навичок у керуванні; можливість встановлення додаткового обладнання; здатність переносити вантажі; окремі види не потребують злітно-посадкової смуги; швидкість польоту до 100 км/год	
БПЛА типу «бабка» або вертоліт	монороторні; велика маневреність; невеликі габаритні розміри; дальність польоту до 80 км; швидкість до 150 км/год; можливість розташування додаткового устаткування	
Гібридні БПЛА	окремі види не потребують злітно-посадкової смуги; можливість вертикального злету-посадки; висота польоту до 5 км; здатність переносити вантажі; тривалість польоту до 10 год; можливість розташування додаткового устаткування; потребують додаткових навичок у керуванні	

Обмеженість корисного навантаження цих безпілотних літальних апаратів, коротка тривалість автономної роботи, залежність від погодних умов, висока вартість, відсутність універсального програмного забезпечення, а також законодавча нерегульованість суттєво обмежують використання БПЛА у сільському господарстві України.

Для забезпечення динамічного оцінювання показників якості стеблової частини льону пропонується використовувати квадрокоптери серії DJI MAVIC 3 (Китай). Переваги цієї серії:

просте та зручне керування, наявність камери з високою роздільною здатністю, дальність польоту апарата до 30 км, опір вітру до 15 м/с. Методика використання БПЛА цієї серії заснована на оцінюванні зміни кольору рослин у процесі вегетації та дозрівання урожаю. Як зазначено вище, кожна фаза росту льону має свої характерні особливості, зокрема, – колір. Використання БПЛА із камерою високої роздільної здатності дозволить документувати та аналізувати в режимі реального часу стан стеблової частини рослин на полі.



Для розроблення ефективної методики оцінювання якості стеблостою льону на першому етапі необхідно проводити збирання фото-даних та фіксувати показники якості рослин стандартними методами. Це дозволить створити калібрувальні таблиці відповідності колірних характеристик рослин та фази дозрівання, довжини та вологості стебел, а також вмісту волокна.

### ВИСНОВКИ

БПЛА мають перспективу використання у сільськогосподарському виробництві. На сьогодні вони найбільш придатні для виконання задач спостереження, збирання інформації, моніторингу та мають значні переваги порівняно з іншими засобами.

Методика використання БПЛА може бути заснована на моніторингу та аналізі колірних характеристик стеблостою льону, що отримані із використанням фото-обладнання. Для розроблення ефективної методики оцінювання показників якості стеблостою льону олійного та льону-довгунця із використанням БПЛА потрібне накопичення даних щодо стану стеблостою залежно від фази стиглості та характеристики стебел. Використання БПЛА для оцінювання стеблостою льону дозволить: проводити моніторинг вирощування льону; з високою точністю вибирати раціональну технологію перероблення льону з урахуванням показників якості стеблостою, що, у свою чергу, дозволить досягти високої ефективності використання біологічного потенціалу урожаю льону олійного та льону-довгунця. Ці методи оцінювання якості посівів є універсальними та можуть бути використані агропромисловими підприємствами.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Drone Engr. (n.d.). *Baby shark VTOL 250 Fixed wing air frame for UAV building*. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.droneassemble.com/product/baby-shark-vtol-250-fixed-wing-kit-air-frame-for-uav-building/>
- Dudarev, I., & Say, V. (2020). Development of resource-saving technology of linseed harvesting. *Journal of Natural Fibers*, 17(9), 1307-1316.
- Edan, Y., Han, S., & Kondo, N. (2009). Automation in agriculture. In S. Y. Nof (Ed.), *Springer handbook of automation* (pp. 1095-1128). Berlin, Heidelberg: Springer.
- FAOSTAT. (n.d.). *Compare Data*. Retrieved May 2, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Sylvester, G. (2018). *E-Agriculture in action: drones for agriculture*. Bangkok: Published by Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Telecommunication Union.
- Trade Map. (n.d.). *ДМСУ, продовольчий експорт (DMSU, food export)*. Retrieved May 5, 2023, from <https://www.trademap.org/Index.aspx>
- Vroegindeweij, B. A., van Wijk, S. W., & van Henten, E. (2014). *Autonomous unmanned aerial vehicles for agricultural applications*. Zurich, Switzerland.
- Wingtra. (n.d.). *VTOL drone – WingtraOne GEN II*. Retrieved May 5, 2023, from <https://wingtra.com/mapping-drone-wingtraone/vtol-drone/>
- Yaheliuk, S., Didukh, V., & Boyko, G. (2020). The improved technology of biomass processing to obtain products of various applications. *Agricultural Machines*, 45, 155-164. <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.382>
- Yinka-Banjo, C., & Ajayi, O. (2020). Sky-farmers: Applications of unmanned aerial vehicles (UAV) in agriculture. *Autonomous Vehicles. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89488>
- Налобіна, О. О. (2008). *Механіко-технологічні основи процесів взаємодії робочих органів льонозбирального комбайна з рослинним матеріалом (Mechanical and technological bases of the processes of interaction of the working bodies of the flax harvester with plant material)* [Дисертація д-ра техн. наук]. Луцький державний технічний університет, Луцьк.
- Сай, В., Дідух, В., & Тараймович, І. (2009). Перспективи вирощування льону олійного на Волині (*Prospects for growing oilseed flax in Volyn*). *Легка промисловість*, 3, 10-11.
- УКРСТАТ. (n.d.). *Сільське господарство України (Agriculture of Ukraine)*. Retrieved May 5, 2023, from [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat\\_u/2021/zb/09/zb\\_sg\\_20.pdf](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/09/zb_sg_20.pdf)
- Хайліс, Г. А., Харчук, О. С., Толстушко, М. М., & Толстушко, Н. О. (2013). Аналіз розстиляльних пристроїв льонозбиральних машин (*Analysis of spreading devices of flax harvesting machines*). *Сільськогосподарські машини*, 26, 120-124.
- Юхимчук, С. Ф. (1998). *Обґрунтування параметрів і дослідження роботи льонобральних апаратів з поперечними рівчачками (Justification of the parameters and study of the operation of the flax-pulling devices with transverse flows)* [Дисертація канд. техн. наук]. Луцький державний технічний університет, Луцьк.
- Ягелюк, С. В., & Дідух, В. Ф. (2020). Концептуальна модель технологій переробки стебел льону (*A concept model of technologies for processing flax stems*). *Сільськогосподарські машини*, 44, 155-164. <https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.300>
- Ягелюк, С., & Дідух, В. (2021). *Формування якості льняної продукції (Flax product quality formation)*. Луцьк: ЛНТУ.

### **Інформація для авторів та читачів**

*Усі статті, що публікуються у журналі, проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів (подвійне сліпе рецензування).*

*Унікальність текстів публікацій перевіряється за допомогою системи пошуку ознак плагіату Unicheck.*

*За достовірність викладених у статті фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор (автори).*

*Авторські права: за авторами зберігаються усі авторські права та права на видання без обмежень.*

*Журнал 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 in the articles.*

*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.*



НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ВИДАННЯ

# СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

**Випуск 49**

ЖУРНАЛ  
«СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ»  
Луцький національний технічний  
університет  
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна  
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua  
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32>

JOURNAL  
«AGRICULTURAL MACHINES»  
Lutsk National Technical  
University  
75 Lvivska st., Lutsk, 43018, Ukraine  
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua  
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32>

Відповідальний за випуск: І.М. Дударев  
Комп'ютерна верстка: О.М. Гапонюк

Підписано до друку 30.06.2023 р., формат 60×84/8.  
Ум. друк. арк. 16,51. 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 № 24919-14859 ПР