



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



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



# СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

## ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

**Наукове видання**

**Збірник заснований  
1995 року**

*У збірнику відображені  
наукові досягнення у галузі  
агроінженерії  
та галузевого  
машинобудування.*

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

**Засновник і видавець:**

*Луцький національний  
технічний університет*

**Випуск 46**

**ТЕХНОЛОГІЯ**

\*\*\*

**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС**

\*\*\*

**ТЕХНІКА**

Луцьк 2021

УДК 631.3

**Сільськогосподарські машини. Вип. 46. ЛНТУ, Луцьк, 2021. 134 с.**

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Луцького національного технічного університету  
(протокол № 11 від 27.05.2021 р.)*

*Збірник 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)*

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

## **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

### **Головний редактор:**

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

### **Заступник головного редактора:**

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

### **Відповідальний секретар:**

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

### **Члени редакційної колегії:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE  
LUTSK NATIONAL  
TECHNICAL UNIVERSITY



# AGRICULTURAL MACHINES

## JOURNAL OF SCIENTIFIC ARTICLES

**Scientific Publication**

**Founded in 1995**

*The scientific achievements  
in the agricultural  
engineering and industrial  
mechanical engineering  
are presented.*

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

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

**Volume 46**

**TECHNOLOGY**

\*\*\*

**TECHNOLOGICAL PROCESS**

\*\*\*

**MACHINERY**

**Lutsk 2021**



UDC 631.3

**Agricultural machines. Vol. 46. LNTU, Lutsk, 2021. 134 p.**

*Academic Council of Lutsk National Technical University  
confirmed for printing  
(record № 11 dated May, 27, 2021)*

*The Journal is inscribed to the category “B” 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 № 15902-4374 IIP dated November, 13, 2009*

## **EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ЗМІСТ

<i>Т.М. Головенко, О.О. Налобіна, О.П. Герасимчук, О.Л. Ткачук, О.В. Шовкомуд</i>	
Математичний аналіз якісних показників луб'яної сировини із льону олійного.....	7
<i>В.Ф. Дідух, Д.С. Альбота</i>	
Визначення коефіцієнта пружності стебел льону олійного.....	21
<i>Р.В. Кірчук, Л.Ю. Забродоцька, К.Є. Коpecь</i>	
Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння зерна бобових культур.....	30
<i>Н.П. Ковальчук, О.П. Герасимчук, Ю.П. Шимчук</i>	
Рекреаційна трансформація приміських лісів Волинської області в умовах сучасності.....	40
<i>Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий</i>	
Застосування лазерного зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК.....	49
<i>О.О. Налобіна, Н.В. Васильчук, П.Г. Івашко</i>	
Експериментальне дослідження взаємодії стебел соняшнику із роторами жатки.....	58
<i>В.О. Ольховський, І.М. Дударев</i>	
Моделювання руху конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу.....	70
<i>С.Г. Панасюк, І.В. Тараймович</i>	
Інноваційна технологія перероблення овочів та фруктів для крафтових агровиробництв.....	85
<i>А.С. Пастушенко</i>	
Моделювання аеродинамічно раціонального розпилувального пристрою.....	93
<i>С.М. Хомич, І.Є. Цизь, В.В. Сацюк, В.А. Павлік</i>	
Удосконалення технології виробництва сапропелевих добрив...	103
<i>В.В. Шевчук, О.М. Сукач, Ю.І. Габрієль, Г.А. Худавердян</i>	
Підвищення ефективності діагностики електронної системи керування сівалкою HORSCH PRONTO DC.....	111
<i>С.В. Ягелюк, В.Ф. Дідух, Т.Н. Артюх, О.В. Голій</i>	
Зусилля різання біомаси олійних луб'яних культур з урахуванням вологості.....	124

## CONTENT

<b><i>T. Holovenko, O. Nalobina, O. Herasymchuk, O. Tkachuk, O. Shovkomud</i></b> Mathematical Analysis of Quality Indicators for Bast Raw Material from Oilseed Flax.....	7
<b><i>V. Didukh, D. Albota</i></b> Determination of the Coefficient of Elasticity of Oil Flax Stems.....	21
<b><i>R. Kirchuk, L. Zabrodotska, K. Kopets</i></b> Mass Transfer Factors Effect on Kinetics of Bean Drying.....	30
<b><i>N. Kovalchuk, A. Herasymchuk, Y. Shymchuk</i></b> Recreational Transformation of Suburban Forests of Volyn Region in Modern Conditions.....	40
<b><i>Y. Kovalchuk, I. Lisoviy</i></b> Application of Laser Strengthening of Road Transport Details in the Agro-Industrial Complex.....	49
<b><i>O. Nalobina, N. Vasylychuk, P. Ivashko</i></b> Experimental Study of the Interaction of Sunflower Stems With Reaper Rotors.....	58
<b><i>V. Olkhovskiy, I. Dudarev</i></b> Modeling of Movement of Design Elements of Scissor-Type Grain Separator.....	70
<b><i>S. Panasyuk, I. Taraymovich</i></b> Innovation Technology of Vegetable and Fruit Processing for Craft Agricultural Production.....	85
<b><i>A. Pastushenko</i></b> Modeling of Aerodynamically Rational Spraying Device.....	93
<b><i>S. Khomych, I. Tsiz', V. Satsiuk, V. Pavlik</i></b> Improvement of Sapropel Fertilizer Production Technology.....	103
<b><i>V. Shevchuk, O. Sukach, Yu. Gabriel, G. Khudaverdyan</i></b> Improving the Efficiency Diagnostics of Electronic Control System of Seeder HORSCH PRONTO DC.....	111
<b><i>S. Yaheliuk, V. Didukh, T. Artyukh, O. Holiy</i></b> The Moisture Influence on the Cutting Effort of Oil Bast Crop Biomass.....	124

## MATHEMATICAL ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS FOR BAST RAW MATERIAL FROM OILSEED FLAX

T. Holovenko<sup>1\*</sup>, O. Nalobina<sup>2</sup>, O. Herasymchuk<sup>1</sup>, O. Tkachuk<sup>1</sup>,  
O. Shovkomud<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine



### ABSTRACT

Flax fiber is used to make textiles, paper and other products. These products are environmentally friendly, so these products are very popular among consumers. In Ukraine, there is no regulatory framework governing the quality of oilseed flax. The article scientifically substantiates the influence of qualitative parameters of oilseed flax straw, namely: average length of stems, diameter and weight of stems on the yield of bast, as well as parameters of oilseed flax retted straw – average length of stems, diameter and weight of stems on fiber yield, which are important in expediency of industrial processing of this bast material. This was done using correlation analysis, a method of three-factor mathematical planning of an experiment using the software product MathCAD 14. The obtained correlation coefficients and three-factor analysis confirmed the importance the yield of bast and the yield of fiber and their direct relationship with the length, diameter and weight of stems. Mathematical modeling and calculations of the influence of oilseed flax straw and retted straw obtained experimentally, on the yield of bast and yield of fiber confirmed the theoretically substantiated hypothesis, which is as follows: the main quality characteristics of oilseed flax straw and retted straw as industrial raw material, littering, straw color group (fiber color group), as well as separability – for retted straw. Secondary importance for straw and retted straw of oilseed flax are technical and total length, diameter, technical part in the total length of the stem, because they are reflected in the values of yield bast and yield fiber.

### Key words:

oilseed flax,  
bast yield,  
fiber yield,  
straw quality indicator,  
quality of flax straw

### Article history:

Received 21.02.2021

Accepted 05.05.2021

### \*Corresponding author:

t.holovenko@lutsk-  
ntu.com.ua

---

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.498>

УДК 677.11.021

**МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЛУБ'ЯНОЇ СИРОВИНИ ІЗ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО****Т.М. Головенко<sup>1\*</sup>, О.О. Налобіна<sup>2</sup>, О.П. Герасимчук<sup>1</sup>, О.Л. Ткачук<sup>1</sup>, О.В. Шовкомуд<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>Національний університет водного господарства та природо-користування, Рівне, Україна**АНОТАЦІЯ**

*У роботі науково обґрунтовано вплив якісних параметрів соломи льону олійного (середня довжина стебел, діаметр і маса стебел) на вихід лубу, а також параметрів трести льону олійного (середня довжина стебел, діаметр та маса стебел) на вихід волокна, що є важливими у визначенні доцільності промислового перероблення цієї луб'яної культури. Дослідження проведені із використанням кореляційного аналізу, методу трифакторного математичного планування експерименту із застосуванням програмного продукту MathCAD 14. Отримані коефіцієнти кореляції та виконаний трифакторний аналіз підтвердили значущість виходу лубу та виходу волокна і їх безпосередній зв'язок із довжиною, діаметром та масою стебел. Математичне моделювання і розрахунки впливу показників соломи та трести льону олійного, що отримані дослідним шляхом, на вихід лубу та вихід волокна підтвердили теоретично обґрунтовану гіпотезу, яка полягала у тому, що основними характеристиками якості соломи та трести льону олійного, як промислової сировини, є вологість, вихід лубу (вихід волокна), група кольору соломи (група кольору волокна), засміченість, а також відокремлюваність (для трести). Другорядне значення для соломи та трести мають технічна та загальна довжина, діаметр і технічна частина в загальній довжині стебла, оскільки відображаються у значеннях виходу лубу та виходу волокна.*

**Ключові слова:**

льон олійний,  
вихід лубу,  
вихід волокна,  
показник якості трести,  
якість трести льону

**Історія публікації:**

Отримано 21.02.2021

Затверджено 05.05.2021

**\* Автор для****листування:**

t.holovenko@lutsk-  
ntu.com.ua

---

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.498>

---

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

Перероблення стебел льону олійного на підприємствах України з метою виготовлення на їх основі текстильних, целюлозно-паперових та інших товарів широкого вжитку – це крок у майбутнє, що відіграє стратегічну роль у формуванні вітчизняного ринку екопродукції [1, 2]. Проте ґрунтовний аналіз загальних методик оцінки якості волокон льону олійного свідчить про повну відсутність нормативної бази не тільки в Україні, а й у світі в цілому [3], яка б регламентувала рівень якості волокна цієї культури.

З метою створення науково-обґрунтованої методології контролю якості соломи та трести льону олійного необхідно визначити їхні якісні характеристики та граничні значення, що будуть вказувати на рівень якості як промислової лубоволокнистої сировини.

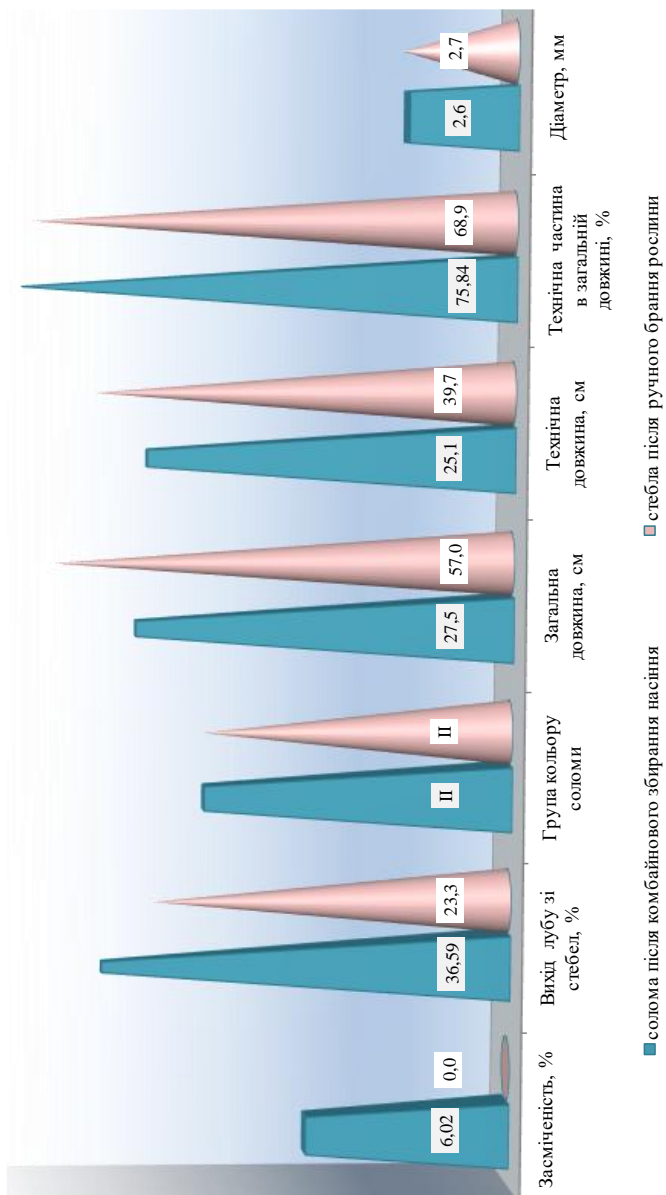
**Мета дослідження** – дослідити вплив якісних характеристик соломи льону олійного (середня довжина стебел, діаметр та маса стебел) на вихід лубу, а також трести (середня довжина стебел, діаметр та маса стебел) на вихід волокна, що є важливими у визначенні доцільності промислового використання цієї культури.

### **Матеріали і методи**

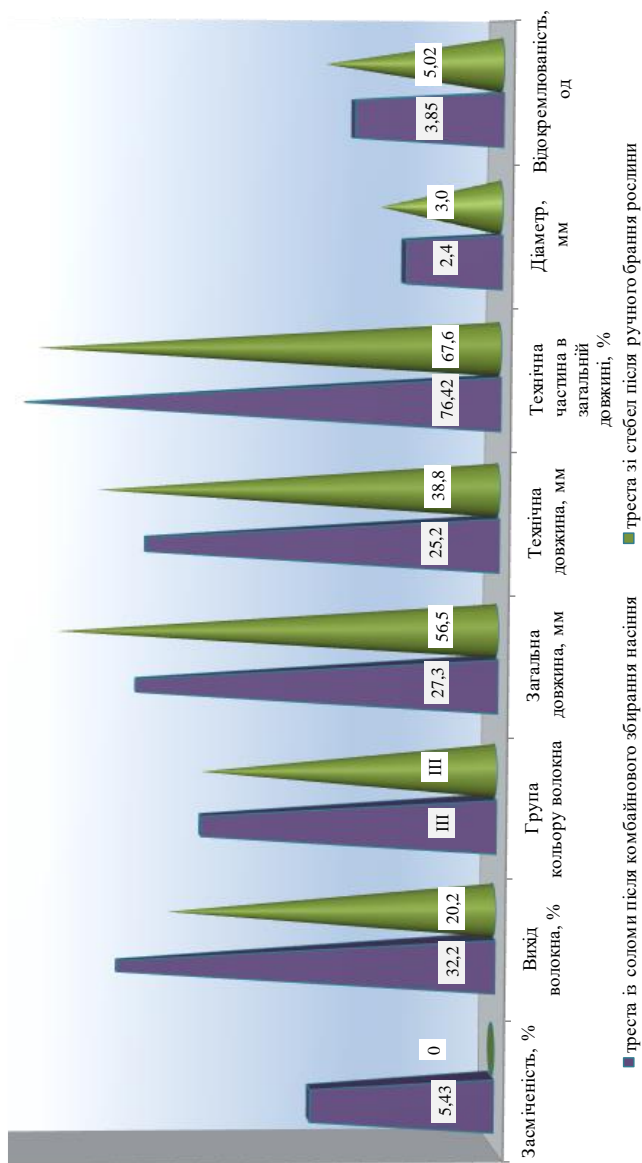
З метою визначення впливу параметрів соломи і трести льону олійного на вихід лубу та вихід волокна було використано метод математичного планування експерименту. Згідно із методикою було проведено розрахунки із застосуванням програмного продукту MathCAD 14 та побудовано матриці математичного планування експерименту, поверхні відгуку, а також отримано регресійні рівняння досліджуваних показників для кожного із сортів льону олійного й визначено критерії Стюдента та Кохрена.

### **Результати дослідження та обговорення**

Під час експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик стебел соломи та трести льону олійного сортів Айсберг, Дебют і Лірина, які зібрані у різний спосіб (способом ручного брання рослин та після збирання зернозбиральним комбайнового), було визначено і узагальнено технологічні показники за середніми та граничними значеннями [4]. Результати досліджень представлені на рис. 1–2. Аналіз отриманих результатів показує, що для стеблової маси льону олійного, яка одержана після збирання зерновим комбайном, характерний високий показник виходу лубу із соломи порівняно із стеблами, які зібрані ручним бранням. У стебловій масі переважна більшість стебел містить лише продуктивну частину стебла без верхівкової та прикореневої частин стебла.



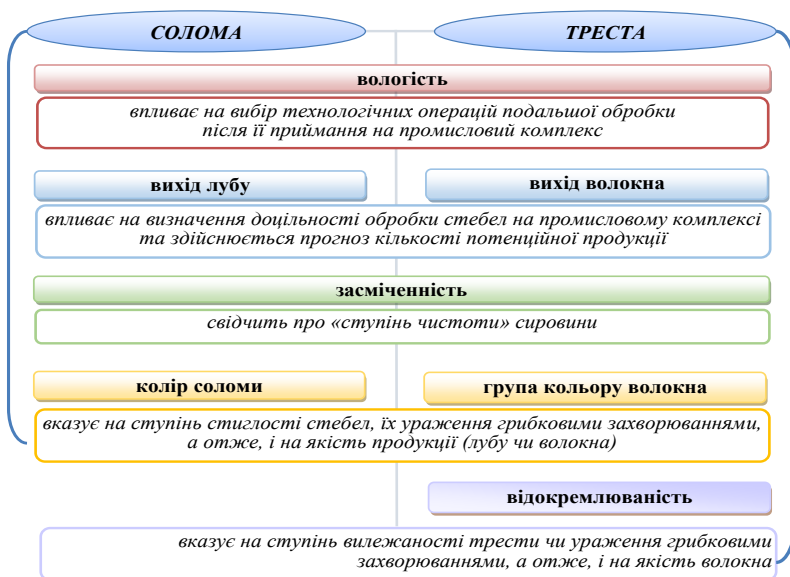
**Рис. 1** – Діаграма середніх значень показників якості проб соломи льону олійного досліджуваних сортів, які зібрані у різний спосіб



**Рис. 2** – Діаграма середніх значень показників проб трести із стебел льону олійного досліджуваних сортів, які зібрані у різний спосіб



За результатами теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що загальний рівень якості стебел льону олійного, як промислової сировини, характеризується, переважно, певними якісними показниками соломи та трести (рис. 3).



**Рис. 3** – Якісні показники соломи та трести льону олійного, як промислової сировини

Отримані під час аналізу результатів експериментальних досліджень висновки щодо впливу загальної та технічної довжини, діаметра та маси стебел на значення виходу лубу та виходу волокна потребують наукового обґрунтування на основі застосування методів математично-статистичного оброблення експериментальних даних.

Для перевірки зв'язку деяких зазначених показників соломи і трести із показниками виходу лубу та виходу волокна, що є важливими для промислового використання льону олійного, проведено низку досліджень. Зокрема, було проведено дослідження впливу показників соломи на вихід лубу. Для вирішення поставленого завдання використано експериментальні дані дослідження технологічних показників соломи льону олійного сортів Айсберг, Дебют та Лірина, яка одержана після комбайнового збирання цієї культури [4]. На основі отриманих даних проведено кореляційний

аналіз якісних показників соломи льону олійного трьох сортів, під час якого встановлено зв'язок між довжиною стебел (середня довжина стебел), діаметром стебел і виходом лубу. Результати кореляційного аналізу узагальнені до середніх значень і представлені у таблиці 1.

**Таблиця 1** – Результати кореляційного аналізу якісних характеристик соломи льону олійного

№ з/п	Сорт	Якісний показник соломи	Середні значення коефіцієнта кореляції	
			середня довжина стебел, мм	діаметр стебел, мм
1	Айсберг	Вихід лубу від загальної маси стебел, %	0,80	0,72
2	Дебют		0,81	0,72
3	Лірина		0,81	0,73

Отримані середні значення коефіцієнта кореляції (таблиця 1) вказують на безпосередній зв'язок між технологічними характеристиками соломи (довжина стебел, діаметр стебел та вихід лубу).

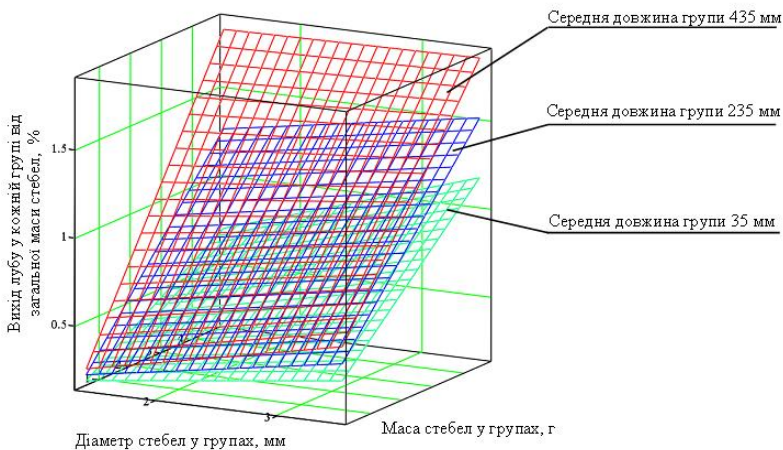
Для встановлення впливу середньої довжини стебел, діаметра та маси стебел на вихід лубу виконані дослідження за методом математичного планування експерименту [5–7]. Згідно із методикою для кожного сорту льону олійного було проведено розрахунки із використанням програмного продукту MathCAD 14, побудовані матриці планування експерименту, поверхні відгуку, а також складені регресійні рівняння й визначені критерії Стюдента та Кохрена. Під час математичного моделювання отримані регресійні математичні моделі  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ , що характеризують вплив якісних показників соломи льону олійного на вихід лубу (де  $y$  – вихід лубу;  $x_1$  – середня довжина стебел;  $x_2$  – середній діаметр стебел;  $x_3$  – маса стебел). Рівняння регресії для соломи льону олійного сортів Айсберг, Дебют та Лірина мають вигляд:

$$y = 0,0003x_1 + 0,0685x_2 + 0,047x_3 + 0,0002x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 + 0,0364x_2x_3 - 0,0002x_1x_2x_3 + 0,0485; \quad (1)$$

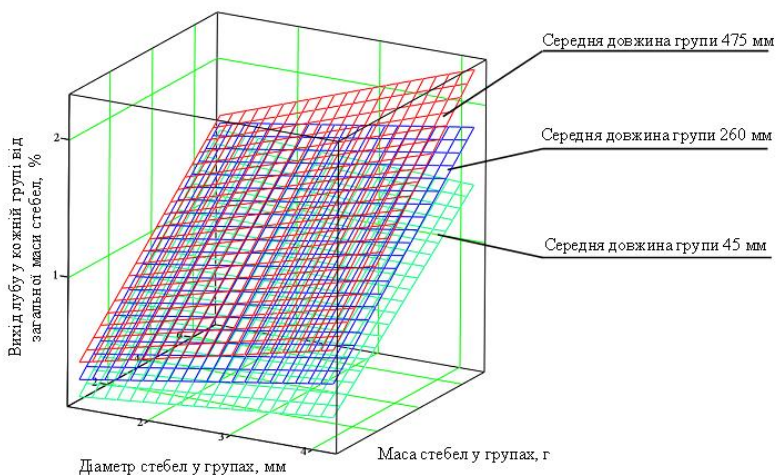
$$y = 0,0004x_1 + 0,0525x_2 + 0,2279x_3 + 0,0002x_1x_2 - 0,0001x_1x_3 - 0,015x_2x_3 + 0,0001x_1x_2x_3 + 0,0284; \quad (2)$$

$$y = 0,0001x_1 + 0,1211x_2 + 0,1608x_3 + 0,0003x_1x_2 + 0,0003x_1x_3 + 0,0303x_2x_3 - 0,0001x_1x_2x_3 - 0,093. \quad (3)$$

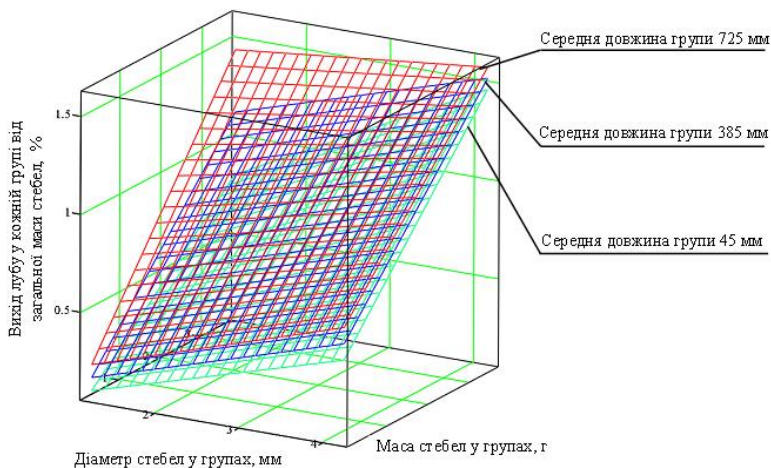
За рівняннями (1)–(3) побудовані поверхні відгуку з натуральними значеннями факторів рис. 4–6.



**Рис. 4** – Вплив якісних показників соломи льону олійного сорту Айсберг на вихід лубу



**Рис. 5** – Вплив якісних показників соломи льону олійного сорту Дебют на вихід лубу



**Рис. 6** – Вплив якісних показників соломи льону олійного сорту Лірина на вихід лубу

Аналіз одержаних результатів досліджень показує, що найбільш вагомими факторами, які функціонально характеризують вихід лубу, є діаметр і маса стебел. Із отриманих регресійних рівнянь (1)–(3) очевидно, що показник виходу лубу збільшується із збільшенням середньої довжини стебел. Це зростання проявляється більш суттєво у разі збільшення маси стебла.

Також було проведено дослідження впливу параметрів трести на вихід волокна. Для вирішення поставленого завдання використано експериментальні дані досліджень технологічних показників трести льону олійного сортів Айсберг, Дебют та Лірина, стебла яких відібрані після комбайнового збирання льону [4]. Кореляційний аналіз якісних показників трести льону олійного трьох сортів дозволив встановити зв'язок між довжиною стебел, діаметром стебел і виходом волокна. Результати кореляційного аналізу були узагальнені до середніх значень та представлені у таблиці 2. Отримані середні значення коефіцієнта кореляції (таблиця 2) вказують на безпосередній зв'язок між технологічними характеристиками трести (довжина стебел, діаметр стебел та вихід волокна).

Визначення впливу середньої довжини стебел, діаметра та маси стебел на вихід волокна відбувалося за методом математичного планування експерименту [5–7]. Згідно із методом та використовуючи програму MathCAD 14 для кожного сорту льону олійного були

проведені розрахунки, побудовані матриці планування експерименту, поверхні відгуку та складені регресійні рівняння й визначені критерії Стюдента і Кохрена.

**Таблиця 2** – Результати кореляційного аналізу якісних характеристик трести льону олійного

№ з/п	Сорт	Якісний показник трести	Середні значення коефіцієнта кореляції	
			середня довжина стебел, мм	діаметр стебел, мм
1	Айсберг	Вихід волокна від загальної маси стебел, %	0,86	0,76
2	Дебют		0,86	0,78
3	Лірина		0,84	0,76

Під час математичного моделювання впливу якісних показників трести льону олійного на вихід волокна були отримані математичні моделі  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ , що характеризують вплив якісних показників трести льону олійного на вихід волокна (де  $y$  – вихід волокна;  $x_1$  – середня довжина стебел;  $x_2$  – середній діаметр стебел;  $x_3$  – маса стебел). Рівняння регресії для трести льону олійного сортів Айсберг, Дебют та Лірина мають вигляд:

$$y = 0,0011x_1 + 0,2093x_2 + 0,2242x_3 - 0,0003x_1x_2 - 0,0003x_1x_3 - 0,045x_2x_3 + 0,0002x_1x_2x_3 - 0,1861; \quad (4)$$

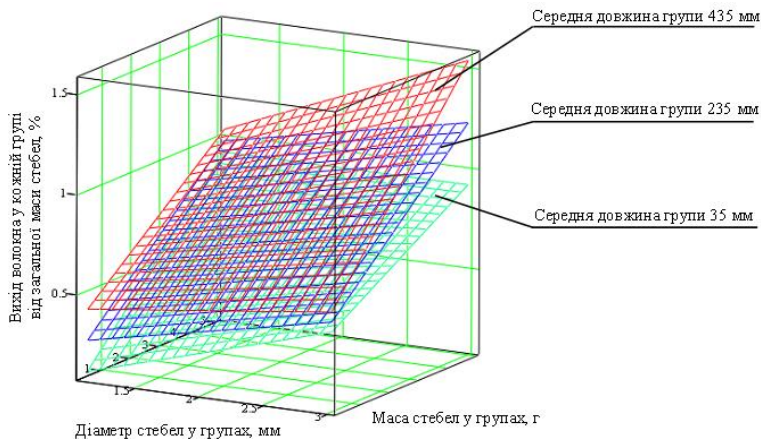
$$y = 0,0006x_1 + 0,1288x_2 + 0,1304x_3 - 0,0001x_1x_2 + 0,0002x_1x_3 - 0,015x_2x_3 + 0,0001x_1x_2x_3 - 0,0468; \quad (5)$$

$$y = 0,0004x_1 + 0,1642x_2 + 0,181x_3 - 0,0001x_1x_2 + 0,0001x_1x_3 - 0,0141x_2x_3 - 0,1842. \quad (6)$$

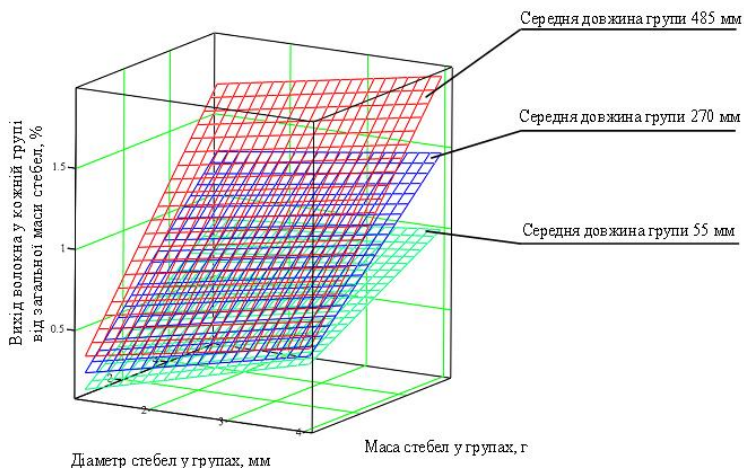
За рівняннями (4)–(6) побудовані поверхні відгуку з натуральними значеннями факторів (рис. 7–9).

Аналіз одержаних результатів вказує на те, що найбільш вагомими факторами, які характеризують вихід волокна, є діаметр та маса стебел. Із рівнянь (4)–(6) очевидно, що показник виходу волокна збільшується із зростанням середньої довжини стебел, причому це зростання більш суттєве за умови збільшення маси.

Отримані коефіцієнти кореляції та проведений аналіз результатів дослідження підтверджують попередні висновки теоретичного аналізу технологічних параметрів соломи та трести льону олійного щодо залежності виходу лубу та волокна від довжини, діаметра та маси стебел льону.



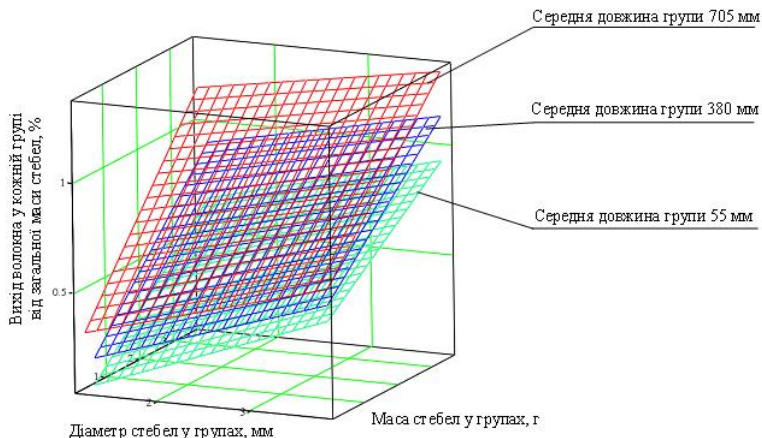
**Рис. 7** – Вплив якісних показників трости льону олійного сорту Айсберг на вихід волокна



**Рис. 8** – Вплив якісних показників трости льону олійного сорту Дебют на вихід волокна

Науково обґрунтовані теоретичні дані та експериментальні значення показників якості стебел соломи льону олійного усіх сортів, достовірність яких доведена математично-статистичним обробленням, були узагальнені до середніх значень. Це дозволяє не урахувувати сорт

льону олійного, оскільки на переробний комплекс може надходити сировина різного складу, тобто, в партії може бути згруповано декілька сортів цієї культури. Отримані технологічні характеристики соломи та трести льону олійного були розділені на основні та другорядні, а також було встановлено діапазон зміни їх значень від мінімального до максимального. Результати узагальнення теоретичних та експериментальних даних представлені в таблицях 3–4.



**Рис. 9** – Вплив якісних показників трести льону олійного сорту Лірина на вихід волокна

**Таблиця 3** – Якісні технологічні характеристики соломи льону олійного

№ з/п	Найменування характеристик	Числові значення характеристик		
		теоретичні	експериментальні	узагальнені
1	2	3	4	5
<b>Основні технологічні характеристики</b>				
1	Вологість технологічна, %	6,0–8,0	6,0–8,0	6,0–8,0
2	Вологість нормована, %	19,0	19,0	19,0
3	Засміченість, %	5,0–20,0	5,28–6,95	5,0–20,0
4	Вихід лубу зі стебел, %	11,0–35,1	15,3–38,51	11,0–40,0
5	Група кольору соломи	I, II, III	I, II	I, II, III

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
Другорядні технологічні характеристики				
6	Загальна довжина, см	25,0–90,0	22,0–73,0	22,0–90,0
7	Технічна довжина, см	15,0–78,0	20,0–57,0	15,0–78,0
8	Діаметр, мм	1,0–4,1	1,6–4,0	1,0–4,1
9	Технічна частина в загальній довжині, %	60,0–86,7	58,5–83,3	60,0–90,0

Таблиця 4 – Якісні технологічні характеристики трести льону олійного

№ з/п	Найменування характеристик	Числові значення характеристик		
		теоретичні	експериментальні	узагальнені
Основні технологічні характеристики				
1	Вологість технологічна, %	6,0–8,0	6,0–8,0	6,0–8,0
2	Вологість нормована, %	19,0	19,0	19,0
3	Засміченість, %	5,0–20,0	4,87–6,02	5,0–20,0
4	Вихід волокна, %	11,0–31,2	11,4–35,59	11,0–40,0
5	Група кольору волокна (показник кольору волокна)	I, II, III, IV (1,0–4,0)	I, II, III, IV	I, II, III, IV (1,0–4,0)
6	Відокремлюваність, од. (ступінь вилежаності трести)	- 4,1 і більше (вилежана); - 3,1–4,0 (недолежана); - 3,0 і менше (солома)	3,0–6,7	- 4,1 і більше (вилежана); - 3,1–4,0 (недолежана); - 3,0 і менше (солома)
Другорядні технологічні характеристики				
7	Загальна довжина, см	25,0–90,0	22,0–67,4	22,0–90,0
8	Технічна довжина, см	15,0–78,0	20,0–57,0	15,0–78,0
9	Діаметр, мм	1,0–4,1	1,4–3,8	1,0–4,1
10	Технічна частина в загальній довжині, %	60,0–86,7	60,7–83,6	60,0–90,0

Представлені у таблицях 3–4 середні результати досліджень були заокруглені до цілих чисел, а для загальної довжини стебел вказано



найбільший показник, оскільки його найменші значення для соломи льону олійного після комбайнового збирання зафіксувати однозначно неможливо. Крім того, найбільше значення засміченості соломи льону олійного було до 20%, оскільки на засміченість соломи значний вплив мають агротехнічні заходи: оброблення посівів чи ґрунту хімічними препаратами від бур'янів та кліматичні умови (кількість опадів тощо).

### **Висновки**

Моделювання впливу показників соломи та трести льону олійного, що отримані дослідним шляхом, на вихід лубу та волокна дозволило підтвердити теоретично обґрунтовану гіпотезу, яка полягала у тому, що основними характеристиками якості соломи та трести льону олійного, як промислової сировини, є вологість, вихід лубу (вихід волокна), засміченість, група кольору соломи (група кольору волокна), а також відокремлюваність (для трести). Другорядне значення для соломи та трести мають технічна й загальна довжина, діаметр та технічна частина в загальній довжині стебла. Отримані науково обґрунтовані результати досліджень були покладені в основу розроблення нормативної документації для визначення якості соломи та трести льону олійного, що дозволяє створити нові ринки вітчизняної сертифікованої сировини із луб'яних культур в Україні, а сільгоспвиробникам раціонально визначати вартість соломи чи трести під час їх реалізації на промислові об'єкти.

### **Список посилань**

1. Alternative oilseed and fibrecrops for cool and wet regions of Europe. (1994). In: S. Hennink, L.J.M. Van Soest, K. Pithan, L. Hof (eds): Proceedings of the COST 814 Workshop. Wageningen, The Netherlands, 163–167.
2. Головенко, Т.Н., Тихосова, А.А., Богданова, О.Ф., Шовкомуд, А.В. (2018). Анализ состояния легкой промышленности Украины. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности, 5, 251–254.
3. Головенко, Т.Н., Бойко, Г.А., Дягилев, А.С., Шовкомуд, А.В. (2017). Промышленное использование соломы льна масличного, как в мире, так и в Украине. Молодий вчений, 1(41), 37–40.
4. Головенко, Т.М., Бойко, Г.А., Іваненко, О.О., Шовкомуд, О.В. (2016). Загальна характеристика показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів. Молодий вчений, 5(32), 218–222.
5. Вардемен, С.Б., Джоуб, Дж.М. (2003). Статистичні методи забезпечення якості: посіб. для вищих навч. закладів. КНТЕУ, Київ, 254.
6. Тихомиров, В.Б. (1974). Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности). Лёгкая индустрия, Москва, 262.
7. Остапчук, М.В., Станкевич, Г.М. (2006). Математичне моделювання на ЕОМ: підручник. Друк, Одеса, 313.

## DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF ELASTICITY OF OIL FLAX STEMS

V. Didukh\*, D. Albota

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### Key words:

oil flax,  
coefficient of elasticity,  
flax stem,  
flax stem rollers,  
flax stem flattening

### Article history:

Received 05.02.2021

Accepted 20.04.2021

### \*Corresponding author:

Didukh\_V@ukr.net

### ABSTRACT

*During flax harvesting flax stems are burned in a field. It is very harmful to the environment. Therefore, it is proposed to use flax stems for fuel production. Also, it is important to develop machine for flax stem harvesting, which would include the mechanism of the stem destruction. It is necessary to substantiate the parameters of such a machine taking into account the properties of flax stems. A new method for determining the coefficient of elasticity of oil flax stems, which takes into account the number of mechanical effects to break the bonds between the components of the stem without breaking the fiber, was proposed in the article. For this purpose, the mechanism for the stem destruction was designed, which consists of a pair of rollers with trapezoidal corrugations and provides the process of breaking the bonds between the flax wood and the flax fibers by flattening. The flattening of the flax stems includes the process of double bending, which is carried out by the mechanism of the stem destruction. The most important parameters for this process are the friction coefficient between the oil flax stems and the metal surfaces of the rollers of destruction mechanism. For the oil flax harvesting technology, which involves harvesting the entire biological yield of the crop (flax seeds and flax fibers), it is very important to reduce the elastic properties of the flax stems without breaking the flax fibers. This technology requires a machine for collecting the pre-cut flax stems with a rotary mower. Also it is important to separate flax seed during the harvesting and to form the flax stem into rolls. The height of the flax band on the field depends on the yield of the flax stem. Taking into account the height of the flax band allowed us to determine the number of roller pairs of the mechanism of the stem destruction.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.487>

УДК 631.361

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРУЖНОСТІ СТЕБЕЛ  
ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО****В.Ф. Дідух\*, Д.С. Альбота**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**

льон олійний,  
коефіцієнт пружності,  
стебло льону,  
рулони стебел льону,  
плющення стебла  
льону

**Історія публікації:**

Отримано 05.02.2021

Затверджено 20.04.2021

**\*Автор для****листування:**

Didukh\_V@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

У статті запропонована методика визначення коефіцієнта пружності стебел льону олійного із урахуванням кількості механічних впливів, що мають місце для руйнування зв'язків між складовими стебла без розриву волокон. Для цього сконструйовано механізм для руйнування стебел льону олійного, основою якого є пара вальців із трапецієвидними рифлями, які забезпечують процес руйнування зв'язків між деревиною та пучками волокон льону шляхом плющення. Плющення стебла льону передбачає подвійний згин у парі виступ-впадина. У цьому випадку важливо урахувати тертя між стеблами льону і металевими поверхнями вальців та удар в зоні дії гострих граней виступів-впадин вальців. Зменшення пружних властивостей стебел льону без розриву волокон забезпечує виконання умови їх збереження, що важливо у випадку застосування технології збирання льону олійного із збереженням для подальшого використання всього біологічного урожаю цієї культури (насіння, волокна). Ця технологія потребує розроблення нового технічного засобу для підбирання валків попередньо зрізаного стеблистою льону олійного роторною косаркою, відокремлення насіння, зменшення пружних властивостей стебел і скручування волокнисто-стеблової маси у рулони. Залежно від урожайності стеблової частини льону олійного буде різною висота валка льону, який обробляється. Проведенні дослідження із урахуванням цього показника дозволили обґрунтувати кількістю пар вальців, які необхідно встановити на запропоновану машину.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.487>

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

Вирощування льону олійного спрямоване на отримання урожаю насіння. У той же час стеблову частину урожаю спалюють у полі або, після подрібнення, заорюють у ґрунт. Такі дії наносять велику шкоду навколишньому середовищу та забруднюють ґрунти. Вирішити проблему можна, якщо знайти застосування стебловій частині урожаю льону олійного. Науковцями доведена перспективність використання волокна із льону олійного у різних сферах та перспективність використання лляної волокнисто-стеблової маси в якості паливних матеріалів [1–3]. Тому, в процесі збирання льону олійного необхідно передбачити можливість формування пакунків відповідного призначення. Для підвищення ефективності подальшого перероблення пакунки льону найкраще виконувати у вигляді малогабаритних циліндричних рулонів. Ефективна та безперебійна робота вузла пресування у машині буде забезпечена, якщо матеріалу надати необхідних пружних властивостей, зміна яких відбувається під впливом механічних дій.

Відомі процеси декортикації стебел під час отримання лубу з конопель [4, 5]. При цьому використовують як стаціонарні машини, так і мобільні агрегати для оброблення стебел у полі. Для декортикації стебел конопель використовують рифлі із криволінійними поверхнями. Стебла льону олійного мають значні відмінності від стебел конопель. Тому відомі методи та технічні засоби не дозволяють отримати позитивний результат при подачі лляної волокнисто-стеблової маси у камеру пресування. У цьому випадку необхідно визначитися з розмірами вальців та формою рифлів. Надмірна пружність стебел льону олійного не дозволяє формувати рулони невеликих діаметрів. Для цього необхідно зменшити пружні властивості стебел та досягти мінімального коефіцієнта пружності без розриву пучків волокон, що дозволить підвищити щільність самих рулонів. Недостатня щільність рулону впливає на його енергетичний та економічний потенціал. Окрім цього, пружність стебел викликатиме і збільшуватиме навантаження на механізми камери пресування та сприятиме швидкому їх зношуванню.

**Мета дослідження** – дослідити пружні властивості стебел льону олійного із урахуванням кількості проминань без розриву пучків волокон.

### **Матеріали і методи**

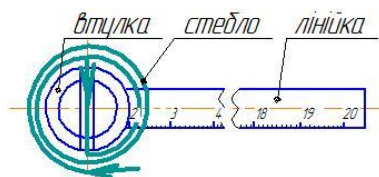
Для визначення коефіцієнта пружності стебел льону олійного використовували запропоновану методику, що передбачає

закручування стебла відносно центральної осі на втулку із прорізью та вимірювання радіуса відновлення стебел після зняття навантаження. Експериментальні дослідження плющення стебел льону олійного проводили на розробленій дослідній установці, яка містить пару вальців із рифлями трапецієвидної форми.

Для визначення пружних властивостей використовувалася втулка з пропилом діаметром 20 мм (рис. 1, а), а для вимірювання радіуса розкручування стебла використовувалася лінійка з ціною поділки 1 мм та циркуль (рис. 1, б). Проведення досліду відбувалося таким чином. Нижній кінець стебла вставлявся у прорізь (не менше 10 мм) та стебло рівномірно закручувалося навколо втулки. Втулку встановлювали на поверхні чистого аркушу паперу, прорізью до поверхні для нанесення відміток. Відмічався центр втулки і фіксувалося її розташування. Після витримки 60 с стебло відпускалося. Стебло почало відновлюватися та розкручуватися. Там, де верхній кінець стебла зупинявся, відмічали точку для вимірювання. Після стабілізації положення стебла (рис. 2, а), знімали втулку та проводили необхідні заміри (рис. 2, б).



а

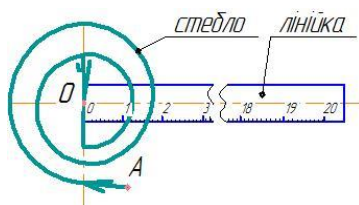


б

**Рис. 1** – Визначення пружних властивостей стебел льону олійного: а – закручування стебел на втулку; б – схема розташування стебел



а



б

**Рис. 2** – Визначення пружних властивостей стебел льону олійного: а – відновлення стебла на втулці; б – точки вимірювання значень

Коефіцієнт пружності стебла визначався через зміну радіуса, який, у свою чергу, визначався відстанню між центром втулки (на рис. 2, б – це точка  $O$ ) та місцем зупинки крайньої точки стебла (на рис. 2, б – це точка  $A$ ). За контрольний варіант приймалося незруйноване стебло. Відстань  $OA$  для нього приймалася за 100%. Припускалося, що будь-який механічний вплив дозволяє зменшити пружні властивості стебел льону олійного не залежно від їх кількості.

### Результати дослідження та обговорення

Один із напрямів підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур – це використання під час збирання всього біологічного урожаю сільськогосподарської культури [4]. Найбільш економічно вигідний напрям використання стеблової частини урожаю льону олійного – це збереження волокна. Вміст у стеблах льону олійного короткого неорієнтованого волокна становить до 25%. При цьому, урожайність соломи сягає 45 ц/га і більше [5–6]. Зберегти високоякісне волокно можна за умови вчасного збирання лляної волокнисто-соломистої маси протягом серпня місяця. У випадку низької якості лляного волокна стебलो-волокнисту масу доцільно використовувати в якості паливних матеріалів, оскільки енергетичний потенціал лляної соломи становить 18 МДж/кг, що на рівні твердих порід дерев [6]. Незалежно від технології збирання льону олійного важливо стебलो-волокнисту масу сформувати у пакунки. Для подальшого використання чи перероблення найбільше підходять циліндричні пакунки, які мають певний діаметр та щільність.

Для формування пакунку важливо, щоб пружність стебел льону була мінімальною та волокнисті пучки були без розриву. Аналіз відомих досліджень з визначення пружних властивостей стебел рослинних матеріалів показує, що під явищем пружності розуміється здатність стебла після відхилення від початкового положення повернутися у початковий стан без руйнування (розриву або зламу в поперечній площині) [7].

Стебло льону можна представити як пустотілий циліндр, в якого розміри поперечного перерізу зменшуються від кореневої частини до верхівкової. У перерізі стебла можна побачити: зовнішній шар – кору, внутрішній шар – деревну складову. Стебло льону дуже витривале, адже за досить малого поперечного січення воно має значну довжину, не ламається та не гнеться. Стебло льону можна порівняти із пустотілим бетонним стовпом, де залізні пруті – це довгі волокна, а в якості бетону – деревні тканини, тільки за бокового навантаження стебло льону має набагато кращу пружність.

Для зменшення пружних властивостей стебел льону олійного запропоновано фізичну модель декортикатора (рис. 3), що містить пару вальців. М'яльні вальці в декортикаторах характеризуються такими параметрами [8]:

- зовнішній діаметр або діаметр кола  $D_3$ , що проходить через вершини рифлів;
- внутрішній діаметр або діаметр кола  $D_6$ , що проходить через точки западин між рифлями;
- кількість рифлів  $z$ ;
- висота рифлів  $h = (D_3 - D_6)/2$ ;
- крок рифлення по колу  $t_z = (\pi - D_3)/z$ ;
- крок рифлення по хорді  $t_x = D_3 \sin(\alpha)$ ;
- кут кроку рифлення  $2\alpha = 360/z$ , що утворюється радіусами, які проходять через вершини сусідніх рифлів;
- радіус заокруглення вершини рифлів  $r_1$ ;
- радіус заокруглення западини між рифлями  $r_2$ ;
- довжина кожного з вальців  $l$ .



**Рис. 3** – Загальний вигляд пари вальців фізичної моделі декортикатора

М'яльні вальці, як правило, виконують із заокругленнями, що вимагає збільшення їх діаметрів та висоти рифлів. Такі вальці у декортикаторах використовуються для проминання стебел конопель. Процес декортикації стебел льону олійного не проводився на етапі його збирання. А відомі лише процеси м'яття трести льону-довгунця в процесі її перероблення під час виділення довгого волокна. Тому вибір профілю рифлів та діаметрів вальців було зроблено із урахуванням максимальної 65 мм і середньої мінімальної довжини 5 мм короткого неорієнтованого волокна.

Таким чином, у запропонованій фізичній моделі декортикатора зовнішні діаметри обох вальців становили 65 мм з рифлями трапецієвидної форми (із розмірами нижньої основи трапеції 8 мм і верхньої основи – 5 мм). Висота рифлів становила 4 мм. Розрахунок з урахуванням зовнішнього і внутрішнього діаметрів вальця та розмірів рифлів дозволив визначити кількість рифлів на вальці  $z = 13$ .

Проминання стебел льону олійного парою м'яльних вальців із визначеними параметрами відрізняється від процесу м'яття вальцями відомих конструкцій, оскільки у цьому випадку має місце удар кромками рифлів при вершині трапеції, власне процес м'яття криволінійними площинами виступів-впадин. Таким чином, у цьому випадку поле декортикації формується за іншими законами у порівнянні із відомими м'яльними вальцями.

Для забезпечення проведення дослідів у період збирального сезону 2020 року в різних точках поля були заготовлені стебла льону олійного. Цей експеримент передбачав дослідження зменшення пружних властивостей для різної кількості стебел і пропусків через вальці. Спочатку проминали по одному стеблу з кількістю повторень від 1 до 5. Готові зразки підписували та відкладали для подальшого їх вивчення. Аналогічно проводили проминання групи із трьох стебел та п'яти. Загалом експериментальні дослідження передбачали проведення 18 дослідів: 3 групи із різним ступенем проминання (1–5) та три контрольні необроблені зразки. Для підвищення достовірності отриманих даних верхівкову частину стебла зрізували, що забезпечило однакову довжину зразків. Результати проведених дослідів представлені у таблиці.

**Таблиця** – Результати визначення коефіцієнта зменшення пружності стебел льону олійного після їх декортикації

Кількість проминань	1 стебло		3 стебла		5 стебел	
	Відновлення, %	Коеф. пружності	Відновлення, %	Коеф. пружності	Відновлення, %	Коеф. пружності
1	52	0,52	83	0,83	92	0,92
2	40	0,40	57	0,57	75	0,75
3	37	0,37	55	0,55	69	0,69
4	37	0,37	52	0,52	67	0,67
5	34	0,34	43	0,43	58	0,58
Ціле стебло	100	1,00	100	1,00	100	1,00



Аналіз отриманих результаті показує, що група стебел льону олійного має більшу пружність не залежно від кількості проминань у порівнянні з одиночним стеблом. Це явище пояснюється тим, що паралельні стебла перебувають у щільному зв'язку між собою і утворюють одне пружне середовище. За витриманого зазору між поверхнями м'яття 2 мм, усі зразки за кількістю стебел проминаються якісно. При цьому, відсоток костриці за масою стебел виділявся у межах похибки досліду, а залишок волокнисто-стеблової маси мав ідентичний вигляд.

Візуальні спостереження вказують, що після першого пропуску через вальці, стебла льону олійного отримують початкові деформації і пружність стебла складається з пружності волокон і зв'язку з кострицею. Після другого проминання характерним є руйнування зв'язку між деревною складовою і волокном та розпочинається виділення костриці. Коефіцієнт пружності стабілізується після третього пропуску через вальці, оскільки після четвертого проминання спостерігається незначне зменшення коефіцієнта пружності. Тому, можна припустити, що після трьох проминань стебла вже є достатньо оброблені, причому розривів волокон не спостерігається. Після п'ятого пропуску через вальці є лише часткове відновлення пружності, але воно пов'язане у більшій мірі з подальшим видаленням костриці, ніж із зменшенням коефіцієнта пружності стебел. Відтак, можна припустити, що це була власна пружність волокон льону олійного.

### **Висновки**

Запропоновані фізична модель декортикатора для оброблення стебел льону олійного, що містить пару вальців з трапецієподібними рифлями, та методика проведення експериментальних досліджень дозволили встановити зменшення коефіцієнта пружності стебел льону олійного залежно від кількості проминань. Також можна зробити висновок щодо встановлення кількості пар вальців на машині для підбирання валків льону олійного за роздільної технології збирання, яких має бути не менше трьох пар для зменшення лише пружних властивостей льону у випадку формування пакунків циліндричної форми необхідного діаметру із урахуванням їх подальшого цільового призначення.

### **Список посилань**

1. Чурсіна, Л.А., Тіхосова, Г.А., Горач, О.О., Янюк, Т.І. (2011). Наукові основи комплексної переробки стебел та насіння льону олійного. Олді-плюс, Херсон, 356.
2. 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.
3. Yaghelyuk, S., Diduh, V., Tkachyuk, V. (2018). Studying the possibilities of producing fuel materials from oil flax wastes in the conditions of Western Polissya. *Știința agricolă / Universitatea agrară de stat din Moldova*, 2, 158–163.
  4. Збирання та декортикація стебел конопель. <http://www.cannasystems.ca>
  5. Гобсон, Р.Н., Гепворт, Д.Г., Брюс, Д.М. (2001). Якість волокна, відокремленого від стебел конопель шляхом декортикації. *Журнал сільськогосподарських технічних досліджень*, 78(12), 153–158.
  6. Дідух, В.Ф., Дуць, І.З., Ягелюк, С.В., Онюх, Ю.М., Бойчук, Б.М. (2017). Технологія переробки стеблової маси льону олійного, отриманої в умовах Західного Полісся. *Сільськогосподарські машини*, 38, 30–38.
  7. Хайлис, Г.А. (2002). *Механика растительных материалов*. УААН, Київ, 374.
  8. Ипатов, А.М. (1989). *Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур: учебник*. Легпромбытиздат, Москва, 144.
  9. Ehrensing, D.T. (2014). Технично-економическое обоснование промышленного производства пеньки в Соединенных Штатах Тихоокеанского Северо-запада. Отдел растениеводства и почвоведения штата Орегон. *Univ. Expt. Sta. Oregon (Университет штата Орегон)*, 140, 1(681), 48–79.

## MASS TRANSFER FACTORS EFFECT ON KINETICS OF BEAN DRYING

R. Kirchuk\*, L. Zabrodotska, K. Kopets

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### Key words:

bean,  
modeling of bean  
drying,  
drying agent,  
drying exposure,  
energy saving

### Article history:

Received 20.01.2021

Accepted 15.04.2021

### \*Corresponding author:

kirchukruslan@lutsk-  
ntu.com.ua

### ABSTRACT

*Drying is the most energy-intensive and complex part of the process of post-harvest processing of crop products. In the choice of drying methods, it is necessary to take into account the technological parameters of the process, such as the initial and final moisture content of raw materials, physical and chemical and thermo-physical parameters, and further ways of processing products. Regardless of the manufacturer, grain dryers of different design have the same operation principle. The drying chamber of the grain dryer is its main design element; therefore, all manufacturers pay attention to its design. Also, the system of preparation of drying agent and the automation system and control system of the dehydration process are important elements of the design of the grain dryer, which need to be improved. However, little attention in the existing designs of dryers is paid to the accompanying systems of intensification of the drying process of plant materials. Taking into account the properties of agricultural materials, in particular legume seeds, a mechanical system of preparation of beans for heat treatment has been developed and the level of influence on drying kinetics, which is decisive in terms of energy saving, has been determined. The article analyzes the influence of mass transfer factors prepared by dissecting the surface, beans and drying agent parameters on the drying process. Mathematical models have been developed, based on the results of which energy-saving rational regimes of heat treatment of grain material for non-seed needs can be calculated. Also, proposed mathematical models based on the use of the basics of the drying and heat-mass transfer theory. Experimental studies have confirmed the adequacy of the proposed mathematical models.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.500>

УДК 631.365:633.34

**ВПЛИВ МАСООБМІННИХ ФАКТОРІВ НА КІНЕТИКУ СУШІННЯ  
ЗЕРНА БОБОВИХ КУЛЬТУР****Р.В. Кірчук\*, Л.Ю. Забродоцька, К.Є. Копець**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**

біб,  
моделювання сушіння  
зерен бобових культур,  
сушильний агент,  
експозиція сушіння,  
енергозбереження

**Історія публікації:**

Отримано 20.01.2021

Затверджено 15.04.2021

**\*Автор для****листування:**kirchukruslan@lutsk-  
ntu.com.ua**АНОТАЦІЯ**

Сушіння – це найбільш енергоємний та відповідальний етап післязбирального оброблення продукції рослинництва. Під час вибору способів сушіння необхідно врахувати технологічні параметри процесу, такі як початкова і кінцева вологість рослинної сировини, її фізико-хімічні та теплофізичні показники, а також подальшу технологію її перероблення. Більшість відомих конструкцій зерносушарок є однотипними за принципом дії. Основний акцент виробниками сушарок робиться на конструкціях сушильної камери та системи приготування сушильного агента, також у сушарці важливими є система автоматизації і контролю перебігу процесу сушіння зерна. Важливо також удосконалювати і інші системи інтенсифікації процесу сушіння рослинних матеріалів. Зважаючи на властивості сільськогосподарських матеріалів, зокрема насіння бобових культур, розроблено механічну систему підготовки бобів до теплового оброблення і визначено рівень впливу оброблення сировини на кінетику сушіння, що є визначальним у напрямі енергозбереження. У статті виконано аналіз впливу розсічення поверхні бобів та параметрів сушильного агента на перебіг процесу сушіння. Розроблені математичні моделі, які дозволяють розрахувати енергозберігаючі раціональні режими теплового оброблення зерна, що використовується не для насінневих потреб. Для математичного опису процесу сушіння бобових культур використовувалися підходи, що базуються на класичних методах моделювання із використанням основ теорії сушіння та теорії тепломасообміну.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.500>

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

Під час обрання способу сушіння зерна необхідно урахувати технологічні параметри процесу, зокрема початкову і кінцеву вологість сировини, її фізико-хімічні та теплофізичні показники, критичну температуру, за якої можливе руйнування основних складових зерна (вітамінів, білків тощо). Аналіз цих параметрів дозволяє синтезувати конструктивні особливості сушильних апаратів, що, у свою чергу, дозволяють застосовувати енергозберігаючі режими сушіння [1–3].

Відомі конструкції зерносушарок є однотипними за принципом дії. Основний акцент під час розроблення конструкцій сушарок робиться на конструкціях сушильної камери та системи приготування сушильного агента, а також системи автоматизації і контролю перебігу процесу сушіння. Разом із тим, у відомих конструкціях сушарок не передбачені системам інтенсифікації процесу сушіння рослинних матеріалів, які передбачають його підготовлення до процесу. Зважаючи на теплофізичні властивості сільськогосподарських матеріалів, зокрема насіння бобових культур, розроблення механічної системи підготовлення бобів до теплового оброблення та визначення впливу оброблення на кінетику сушіння є актуальним завданням. Вирішення цієї задачі дозволить суттєво зменшити енергетичні витрати на процес післязбирального оброблення зернового матеріалу.

**Мета дослідження** – дослідити вплив масообмінних факторів підготовлених до сушіння бобів та параметрів сушильного агента на кінетику процесу сушіння, що дозволить обґрунтувати енергозберігаючі раціональні режими теплового оброблення сировини.

### **Матеріали і методи**

Для математичного опису процесу сушіння зерна бобових культур використовувалися підходи, що базуються на класичних методах моделювання із використанням основ теорії сушіння та теорії тепломасообміну.

### **Результати дослідження та обговорення**

Проведений аналіз методів інтенсифікації сушіння зерна бобових культур та експериментальних даних вказує на доцільність попереднього підготовлення матеріалу до сушіння. Для підготовлення зерна бобових культур до процесу сушіння розроблена технологія, яка забезпечує формування зони пошкодження оболонки плоду бобових – надріз [4]. Проведене у такий спосіб підготовлення бобів до сушіння дозволяє забезпечити кращу взаємодію сушильного агента з матеріалом та інтенсифікує процес видалення вологи з нього. Також

інтенсифікувати процес видалення вологи можна шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента. Тому було проведено теоретичний аналіз сумісного впливу цих факторів на перебіг процесу сушіння.

Розглянемо вплив масообмінних факторів на кінетику процесу сушіння, якщо зернина (біб) розсічена. Під час розсічення зернини з'являється новоутворена відкрита поверхня, з якої інтенсивно (швидше, ніж з усієї поверхні) випаровується волога. Інтенсивність випаровування настільки висока, що теплота відбирається не тільки з повітря, а також із самого тіла зернини, що призводить до зменшення його температури. З точки зору зміни закономірності сушіння, появу "нової" поверхні можна розглядати як наявність в тілі, що піддається сушінню, додаткового стоку маси (вологи) або ж джерела видалення вологи з інтенсивністю, яка визначається законом масовіддачі. У цьому випадку випаровування вологи можна описати за допомогою рівнянням Дальтона [4]:

$$\frac{dG_w}{ds \cdot d\tau} = m(\tau), \quad (1)$$

де  $ds$  – поверхня випаровування,  $m^2$ .

Наявність додаткового джерела видалення вологи призводить до зростання нерівномірності розподілу вологовмісту в об'ємі зернини, що спричиняє об'ємно-напружений стан поверхневого шару (зони). Результатом цього є деформація тіла за рахунок усадки колоїдної речовини, а саме "розгортання" зони розсічення і, відповідно, зміна ефективного розміру зернини і збільшення ефективної площі масообміну. Оскільки, відповідно до теорії сушіння [6], величина усушки пропорційна вологовмісту матеріалу, то розмір "розгорнутої" зони розсічення можна визначити таким чином:

$$l = l_0 \beta_e u, \quad (2)$$

де  $l_0$  – початковий розмір розсічення;  $\beta_e$  – коефіцієнт лінійної усадки (для зерна –  $\beta_e = 1,1-1,4$  [6]);  $u$  – вологовміст зернини, кг/кг.с.р.

Оскільки вологовміст зменшується, то буде зменшуватися і поверхнева зона. Зменшення поверхні зернини призводить до розгортання зони надрізу. Таким чином, для швидкого "розгортання" зони надрізу і збільшення інтенсивності додаткового джерела видалення вологи доцільно прискорити процес сушіння на початковому етапі.

Інтенсивне видалення вологи з відкритої поверхні призводить до висихання поверхні і заглиблення зони випаровування. Таким чином, інтенсивність додаткового джерела видалення вологи буде із часом знижуватися  $m = m(\tau)$ . Урахувати вплив додаткового поверхневого

джерела видалення вологи можна таким чином: у граничну умову додається складова, яка ураховує додаткове джерело видалення вологи:

$$-a_m \rho_0 \left( \frac{du}{dr} \right)_s + \frac{\rho_0 \cdot \beta}{a_m} \left[ u - u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} \right] = 0, \quad (3)$$

де  $m_0$  – максимальна інтенсивність видалення вологи.

Нехай, за аналогією з температурою “мокрого” термометра  $t_m = t_c - \frac{r \cdot m}{\alpha}$  [7], величина  $u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} = u_m$  визначає вологовміст “микрої” поверхні. Тоді, замінивши величину  $u_p$  на  $u_m$ , можна використати вже відомі розв’язки [4]:

$$u(r, \tau) = u_m + (u_0 - u_m) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \cdot \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{(\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n) \cdot \mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (4)$$

$$\text{де } u_m = u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}.$$

У випадку  $u_m \rightarrow u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}$ , матимемо:

$$-\frac{du(\tau)}{d\tau} = K(\theta)u(\tau) - u_m(\tau). \quad (5)$$

Рівняння кінетики сушіння (5), на відміну від відомого, ураховує інтенсивність випаровування із відкритої поверхні (інтенсивність випаровування не змінюється з часом).

У випадку зміни інтенсивності випаровування із відкритої (новоутвореної) поверхні з часом можна, за аналогією із зміною загальної швидкості сушіння з часом, прийняти експоненціальний закон зміни інтенсивності випаровування вологи, а саме:

$$m(\tau) = m_0 \cdot e^{-k\tau}, \quad (6)$$

де  $m_0$  – інтенсивність випаровування на початку процесу сушіння (максимальна інтенсивність), кг/(м<sup>2</sup>·с).

Тоді гранична умова (3) матиме вигляд:

$$-a_m \rho_0 \frac{du(R, \tau)}{dr} + \beta \cdot \rho_0 [u - u_p] + m_0 e^{-k\tau} = 0. \quad (7)$$

Розв’язок диференціального рівняння масопровідності із урахуванням початкової умови і граничної умови (7) аналогічний

розв'язку рівняння теплопровідності кулі за наявності негативного джерела теплоти (теплота на випаровування поверхні) [2]:

$$\frac{u(r, \tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \frac{R \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m \cdot \sin \sqrt{Pd_m} \cdot \frac{r}{R}}{r \cdot \left[ (Bi_m - 1) \cdot \sin \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \cos \sqrt{Pd_m} \right]} \cdot e^{-Pd_m \cdot Fo_m} + \sum_{n=1}^6 \left[ 1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right] \cdot A_n \cdot \frac{R \cdot \sin \mu_n \cdot \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (8)$$

де  $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$ ;  $Pd_m = \frac{k}{a_m} R^2$  – масообмінний аналог

критерію Предводітеля;  $\bar{\theta}_m = \frac{m_0}{\beta(u_0 - u_p)}$  – безрозмірний комплекс

(критерій) масообміну.

Зміну середнього вологовмісту з часом можна визначити інтегруванням функції  $u(R, \tau)$  [4]:

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \cdot \left[ \frac{3 \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m (tg \sqrt{Pd_m} - \sqrt{Pd_m})}{Pd_m \left[ (Bi_m - 1) \cdot tg \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \right]} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left( 1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (9)$$

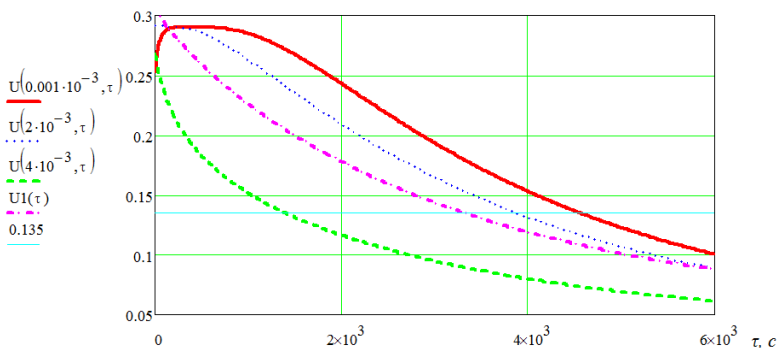
де  $B_n = \frac{6Bi_m^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}$ .

На рис. представлені графічні залежності зміни вологовмісту за радіусом зернини з часом. Аналізуючи отримані графіки можна зробити висновок, що за наявності додаткової поверхні випаровування поверхневі шари бобу висихають швидше, а експозиція сушіння (зміна середнього за об'ємом вологовмісту) зменшується з 3600 с до 3000 с.

Доцільно також розглянути вплив параметрів, що характеризують зовнішню масопередачу – від матеріалу до сушильного агента. Наявність відкритої поверхні збільшує інтенсивність видалення вологи з поверхневої зони зернини, що призводить до збільшення усадки поверхні і “розгортання” об'єму зернини. Тому доцільно інтенсифікувати саме перший період зневоднення. Оскільки температура сушильного агента обмежена, то доцільно розглянути



можливість інтенсифікації процесу сушіння за рахунок швидкості сушильного агента.



**Рис.** – Графічна залежність зміни вологовмісту за радіусом зернини з часом

У науковій праці [8] представлена експериментальна формула, яка отримана при випаровуванні води із кульок різного діаметра у вимушений потік повітря:

$$Nu_m = 0,9 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr_m^{0,33}, \quad (10)$$

де  $Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$  – критерій Рейнольдса;  $Pr_m = \frac{\nu}{\alpha_v}$  – масообмінний

критерій Прандля;  $Nu_m = \frac{\beta}{D} \cdot d_e$  – масообмінний критерій Нусельта;

$d_e$  – еквівалентний діаметр, м;  $v$  – швидкість потоку повітря, що обтікає кулю, м/с;  $\beta$  – коефіцієнт масообміну, м/с;  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с;  $D$  – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_v$  – коефіцієнт масопровідності повітря, м<sup>2</sup>/с.

Ураховуючи критеріальну залежність [4], можна визначити коефіцієнт масообміну з рівняння:

$$\beta = 0,9 \cdot v^{0,5} \cdot d_e^{-0,5} \cdot D_v^{0,67} \cdot \nu^{0,17}. \quad (11)$$

Коефіцієнт дифузії є функцією температури повітря:

$$[D(t)] = 0,00078 \left( \frac{T_v}{273} \right)^{1,21}, \quad (12)$$

де  $T_v = t_v + 273$  – температура повітря, °С.

В'язкість – це функція вологовмісту повітря:

$$\nu = \nu_0 + k \cdot X. \quad (13)$$

Інтенсифікація процесів тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом дозволяє збільшити продуктивність технологічного обладнання і знизити енергоємність процесу.

Інтенсифікувати підведення теплоти і видалення вологи можна двома шляхами: збільшенням температури сушильного агента і температурного напору або збільшенням швидкості переміщення сушильного агента відносно поверхні бобу. Внутрішні вологопереміщення інтенсифікують підвищенням температури бобу і зменшенням гальмуючої дії температурного градієнта. Проте, можливість збільшення температури сушильного агента обмежена термолабільними властивостями рослинного матеріалу, а інерційність вологопровідності призводить до перегріву поверхні зернини. Збільшення швидкості сушильного агента обмежене виносом матеріалу із сушильної камери. Разом із тим, ураховуючи значну швидкість витання бобових (10–15,5 м/с) швидкість сушильного агента можна збільшувати, але не вздовж усього сушильного тракту. Кількість вологи, що видаляється безперервно, зменшується відповідно до кінетики сушіння [3, 6]:

$$W = G_0(u_0 - u(X)), \quad (14)$$

$$W = G_0 u_0 - G_0 \left[ u_p + (u_0 - u_p) \cdot e^{-kx} \right]. \quad (15)$$

Оскільки кількість вологи в бобі зменшується вздовж сушильного тракту (висоти сушильної зони зерносушарки), доцільно зменшувати і кількість підведеної до матеріалу теплоти шляхом зменшення подачі сушильного агента за висотою сушарки. Оскільки кількість сушильного агента визначена (для певного типу сушарки) за кількістю вологи, що видаляється за весь процес сушіння, то ця кількість є середнім значенням витрат  $\bar{G}_{c.a.}$ . Приймавши кількість сушильного агента в кінцевій зоні (відповідно до кількості вологи, що видаляється)  $G_2$ , можна визначити кількість сушильного агента в початковій зоні сушіння  $G_1$ . Кількість сушильного агента в сушарках із продуктивністю  $G = 5\text{--}12$  т/год. складає  $G_v = 4,45$  кг/с [9] на одну планову тону матеріалу. Ураховуючи кінетику сушіння бобових, в першому наближенні прийнято лінійний характер розподілу витрат сушильного агента за висотою сушарки:

$$G_v(X) = 6,7 - 0,9H, \quad (16)$$

де  $H$  – висота сушильної камери, м.

У сушарці із газорозподільними коробами змінити подачу повітря за висотою камери сушіння можна шляхом забезпечення диференційованого підведення сушильного агента в камеру.

Параметри процесу подальшого сушіння зерна сої в прямоточній зерносушарці визначаються за залежностями:

- температура зерна:

$$\theta(x) = \theta_1 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}); \quad (17)$$

- температура сушильного агента:

$$t(x) = \theta_0 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}) + \Delta T_0 e^{-bx}; \quad (18)$$

- вологовміст зерна (абсолютна вологість):

$$u(x) = u_p + \Delta u_0 \cdot \exp[-Ax + B(1 - e^{-bx})]; \quad (19)$$

- вологовміст сушильного агента:

$$d(x) = d_1 + B_1 \cdot \ln \frac{G_1 - ax}{G_1} + \frac{b \cdot A_2}{a} \cdot x, \quad (20)$$

де  $t$ ,  $\theta$  – відповідно, температура сушильного агента і зерна бобових, °С;  $b$  – коефіцієнт апроксимації;  $u$  – вологовміст зерна, кг/кг;

$$K_1 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot c_p}; \quad K_2 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot G_m \cdot c_s}; \quad s - \text{площа поперечного перетину}$$

шару зерна;  $\rho$  – насипна щільність шару зерна;  $d_e$  – еквівалентний діаметр зернини;  $c_s$  – теплоємність зерна і сушильного агента;  $a$  – коефіцієнт теплообміну;  $u_p$  – рівноважний вологовміст кг/кг;  $x$  – координата, м;  $G_1$  – витрата сушильного агента на вході в сушарку,

$$\text{кг/с; } A_1 = G_0 \Delta u_0 A; \quad A_2 = G_0 \Delta u_0 \cdot b \cdot B; \quad B_1 = \frac{1}{a} \left[ \frac{b \cdot A_2 \cdot G_1}{a} - A_1 + A_2 \right].$$

## Висновки

Формування “нових” поверхонь випаровування шляхом утворення розсічення поверхні бобу дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на 20–55% залежно від ступеня розсічення. Для кількісної оцінки ступеня інтенсифікації процесу сушіння запропоновано ввести коефіцієнт розсічення, який характеризує приріст площі випаровування і кількісний показник інтенсивності теплообміну – еквівалентний (ефективний) радіус зернини, який можливо змінювати в межах 1,0–1,1. Розроблено математичні моделі процесу сушіння зерна сої нагрітим повітрям, які ураховують стан матеріалу, що характеризується еквівалентним розміром, залежним від коефіцієнта розсічення, та інтенсивність випаровування із новоутвореної поверхні. Адекватність математичних моделей підтверджена результатами експериментальних досліджень,

оскільки відхилення між теоретичними та експериментальними даними знаходиться межах 3–7% [4].

### Список посилань

1. Лыков, А.В. (1956). Тепло- и массообмен в процессах сушки. Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 464.
2. Лыков, А.В. (1967). Теория теплопроводности. Высшая школа, Москва, 599.
3. Гинзбург, А.С. (1973). Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Пищевая промышленность, Москва, 528.
4. Копець, К.Є. (2006). Розробка та обґрунтування параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння [Дисертація канд. техн. наук]. Львівський національний аграрний університет, Дубляни, 189.
5. Кірчук, Р.В., Цизь, К.Є. (2014). Машина для деформації насіннєвих оболонки. Патент №87184, Україна.
6. Лыков, А.В. (1968). Теория сушки. Энергия, Москва, 471.
7. Птицин, С.Д. (1978). Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур. Труды ВИМ, 35, 12–14.
8. Рудобашта, С.П. (1980). Массоперенос в системах с твердой фазой. Химия, Москва, 248.
9. Гержой, А.П., Самочетов, В.Ф. (1967). Зерносушение и зерносушилки. Колос, Москва, 338.

## RECREATIONAL TRANSFORMATION OF SUBURBAN FORESTS OF VOLYN REGION IN MODERN CONDITIONS

N. Kovalchuk, A. Herasymchuk\*, Y. Shymchuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### **Key words:**

forest,  
phytomelioration,  
recreation,  
recreational  
transformation,  
urban conditions

### **Article history:**

Received 15.02.2021

Accepted 27.04.2021

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

alex\_gop\_ukr@ukr.net

### **ABSTRACT**

*The article analyzes the current problems of suburban forests. The problems of their recreational transformation in the conditions of Volyn are studied. Ways to ensure high phytomeliorative efficiency of the forest are analyzed. Models of recreational transformation of forests in modern conditions are described and the model most optimal for forests of Volyn region is determined. The development of recreation in Volyn since 1996 is considered. The main problems are highlighted and the possibility of reducing and regulating recreational loads on the suburban forests of Volyn is described. Research and analysis of the recreational transformation of the suburban forests of Volyn was carried out in order to rationally combine the main purpose of the forest park with the proper organization of forest use. Forests in the Volyn region, which were included in the system of suburban parks, turned into forest parks without design. This negatively affected the condition of forests, as their flora and fauna became impoverished. The object of the study was the forests of the suburban zone of Volyn region. In the course of the research the methods of observation, description, comparative analysis and synthesis, generalization were used, and also the system method, field method, method of route inspections were applied. An integrated approach to the problem of recreational transformation of suburban forests taking into account the negative factors of modern urbanization, characterized by the trend of global climate change and the search for alternative solutions to these processes in the regions, namely maximum afforestation and search for new species of trees resistant to modern climate changes and pests that would maximally perform their phytomeliorative functions.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.492>

УДК 712.4 (477.82)

**РЕКРЕАЦІЙНА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРИМІСЬКИХ ЛІСІВ  
ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ В УМОВАХ СУЧАСНОСТІ****Н.П. Ковальчук, О.П. Герасимчук\*, Ю.П. Шимчук**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**ліс,  
фітомеліорація,  
рекреація,  
рекреаційна  
трансформація,  
урбогенні умови**Історія публікації:**

Отримано 15.02.2021

Затверджено 27.04.2021

**\*Автор для****листування:**

alex\_gop\_ukr@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

У статті проведено аналіз сучасних проблем приміських лісів, зокрема проблеми їх рекреаційної трансформації в умовах Волині. Проаналізовано шляхи забезпечення високої фітомеліоративної ефективності лісу. Описано моделі рекреаційної трансформації лісів в умовах сучасності та визначено модель, яка найбільш оптимальна для лісів Волинської області. Зазначено, що ліси, які трансформувалися за екстенсивною моделлю, опинилися у вирі стихійної рекреації, що негативно позначилося на їх стані (збіднення рослинного і тваринного світу). Встановлена можливість зменшення і врегулювання рекреаційних навантажень на приміські ліси. Дослідження рекреаційної трансформації приміських лісів проводилося з метою раціонального поєднання основного призначення лісопаркової частини з правильною організацією лісокористування. Для дослідження застосовувалися методи спостереження, опису, порівняльного аналізу та синтезу, узагальнення, системний метод, польовий метод та метод маршрутних обстежень. У статті застосовано комплексний підхід до проблеми рекреаційної трансформації приміських лісів із урахуванням дії негативних факторів сучасної урбанізації, що характеризується тенденцією до глобальної зміни клімату. Тому важливим є пошук альтернативних рішень протидії цим процесам у регіонах України, а саме максимальне заліснення та пошук нових видів деревних рослин, що стійкі до сучасних змін клімату і шкідників, а також які б максимально виконували покладені на них фітомеліоративні функції.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.492>

### Стан питання та постановка проблеми

У зв'язку із невинно зростаючими процесами урбанізації значно посилюється антропогенний вплив на приміські ліси як Волинської області, так і України в цілому. Зазвичай такий вплив призводить до витоптування, механічного пошкодженням і знищення підросту, підліску, надґрунтового покриву та ущільнення ґрунту. При цьому найбільш суттєво змінюються об'ємна маса і твердість верхнього шару ґрунту. Надалі, пряма дія та наслідки (погіршення санітарного стану насаджень, зрідження деревостану, зменшення зімкненості підросту й підліску тощо) у сукупності доволі часто призводять до зміни екологічних режимів лісового середовища, які, у свою чергу, зумовлюють структурні зміни рослинних угруповань. Рослинний покрив досить чутливо реагує на зміну екологічних чинників і така реакція фіксується візуально за динамікою біометричних показників деревостану, рясності та проективного покриття трав'янистих рослин. Основне завдання організації і ведення лісового господарства у приміських лісах – це збереження і поліпшення оздоровчих та захисних властивостей лісів, підвищення їх продуктивності і стійкості до різних форм антропогенного впливу, підтримання рівноваги лісових екосистем і створення сприятливих рекреаційних умов для масового відпочинку населення.

Проведено багато досліджень щодо впливу процесів урбанізації як на міські зелені насадження, так і на приміські й більш віддалені від населених пунктів ліси. Також досліджено роль міської дендрофлори і лісових культур у забезпеченні фітомеліоративної ефективності. Вивчення та узагальнення набутого досвіду є актуальним завданням з точки зору як екології, урбоекології, фітомеліорації, фітоценології, так і містобудування та лісівництва. Крім того, науковці досліджують можливість використання лісів для рекреації. Зокрема, вказані проблеми розглянуті у працях відомих вчених Кучерявого В.П. [2], Атрохіна З.П. та Курамишина В.Я. [1], Sukopp H. та Wittig R. Дослідження з питань благоустрою здійснювали такі вчені, як Генсірук С.А., Третяк П.Р., Фурдичко О.І. Питання оцінювання та використання рекреаційно-оздоровчих лісів висвітлені у працях Криницької Н.Г., Миклуша С.І., Миклуша Ю.С., Руденко В.П. та інших. Однак, деякі питання залишаються невирішеними. На думку багатьох вчених структура такого рекреаційного лісу повинна мати дві основні, доведені до максимуму якості – це рекреаційна ємність одиниці площі та ступінь цілощого впливу на індивідуум.

**Мета дослідження** – полягає у вивченні рекреаційної трансформації лісів Волинської області та пошуку моделі

“оптимально-рекреаційного лісу” для вдалого поєднання основного призначення лісопаркової частини з правильною організацією лісокористування.

### **Матеріали і методи**

Програмою досліджень передбачалося вивчення рекреаційної трансформації лісів Волинської області та пошук моделі “оптимально-рекреаційного лісу”. Об’єктом дослідження були ліси приміської зони Волинської області. Під час дослідження застосовувалися методи спостереження, опису, порівняльного аналізу та синтезу інформації, узагальнення, а також були застосовані системний і польовий методи, метод маршрутних обстежень.

### **Результати дослідження та обговорення**

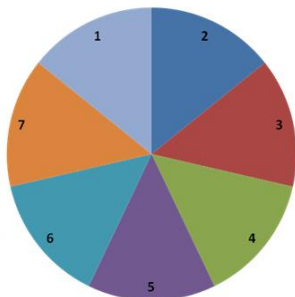
В умовах сучасності лісова рекреація, як особливий вид природокористування, висуває низку нових технічних і господарських завдань, що зумовлюють розвиток лісівництва на основі лісового ландшафту. Міжнародна організація лісового господарства і лісової науки (JUFRO) створила спеціальний підрозділ – “міські ліси”, завданням якого є дослідження проблем соціальної і, зокрема, рекреаційної ролі лісів [2]. Усі насадження об’єктів рекреаційного призначення, на нашу думку, а саме, ліси зелених зон міст та інших населених пунктів, ліси санітарної охорони курортів, замиські та міські лісопарки, замиські і міські парки, парки-пам’ятки садово-паркового мистецтва, національні та природні парки, зелені насадження лікувально-оздоровчих установ, міські ліси, якщо не пройшли, то обов’язково повинні пройти процес культурної трансформації ландшафту, що дозволить забезпечити рекреаційні запити населення, зокрема оздоровчі, пізнавальні та естетичні. У зв’язку із цим, виникає необхідність вивчення фітомеліоративної ефективності рекреаційного лісу та пошуку його оптимальної моделі. Концепція оптимально-рекреаційного лісу (ОРЛ) містить принципи, що зазначені на рис. 1.

Існує дві моделі рекреаційної трансформації лісів. Багато лісових масивів, які були включені в систему приміських парків і лісопарків перетворювалися в лісопарки без проектування та теоретичного обґрунтування. Така модель трансформації характеризується мінімальним благоустроєм та збереженням природи в первинному вигляді. Ліси, які трансформувалися за такою моделлю, опинилися у вирі стихійної рекреації, що значною мірою негативно позначилося на їхньому стані. Це спричинило рекреаційну дегресію ґрунтів, збіднення рослинного і тваринного світу, низький рівень їх оздоровчих, пізнавальних та естетичних функцій, що унеможливило повноцінне



забезпечення рекреаційних запитів населення та збереження насаджень в контексті сталого лісового розвитку. Тому цю модель можна вважати екстенсивною.

### ОРЛ



**Рис. 1** – Діаграма концепції ОРЛ:

- 1 – безперервно-продукуючий ліс; 2 – відповідність призначенню;
- 3 – догляд за ґрунтом; 4 – поточний річний приріст (цілющий вплив лісу прямопропорційний метаболічній активності дерев);
- 5 – оптимальний біологічний кругообіг речовин в екосистемі;
- 6 – збереження самобутності типів лісу;
- 7 – обмежені лісгосподарські заходи

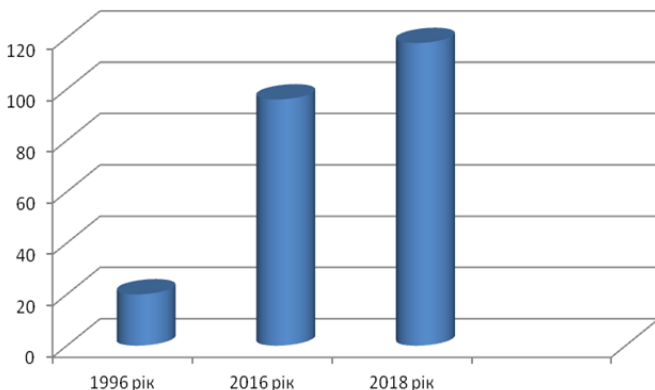
Інтенсивне перетворення лісів у лісопарки, на нашу думку, відбувається на основі поглибленого благоустрою територій, а саме шляхом будівництва мостів, доріг та облаштуванням місць відпочинку, спортивних споруд, дитячих майданчиків, а також шляхом влаштування прогулянкових доріжок і стежок.

У 2017 році площа лісів Волині становила 702 тис. га, що склало 34% загальної площі області, а у 2018 році – 34,6%. Лісові масиви Волинської області зосереджені переважно у північній та східній частині. Усі ліси Волині належать до рівнинних. До структури лісового фонду області входять ліси чотирьох категорій:

- ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення;
- рекреаційно-оздоровчі;
- захисні;
- експлуатаційні.

Рекреаційно-оздоровчі лісові насадження складають близько 7% від частки площі в лісовому фонді. Незважаючи на низький відсоток

рекреаційно-оздоровчих лісів, сьогодні рекреація на Волині розвивається швидкими темпами. Ще у 1996 році рекреаційних зон відпочинку в області налічувалося близько двадцяти. У 2016 році – дев'яносто шість, а на кінець 2018 року – сто вісімнадцять рекреаційних об'єктів (рис. 2) і їх кількість продовжує зростати.



**Рис. 2** – Діаграма розвитку рекреаційних об'єктів у Волинській області

Поряд із великими рекреаційними пунктами у кожному районі Волинської області влаштовані малі зони відпочинку загальною чисельністю шістьсот п'ятдесят п'ять. Найбільше рекреаційних пунктів на території ДП “Маневицьке ЛГ” – чотирнадцять. У ДП “Камінь-Каширське ЛГ” – дев'ять; у ДП “Ківерцівське ЛГ” та ДП “Цуманське ЛГ” – по вісім; у ДП “Ковельське ЛГ” та ДП “Любешівagroліс” – по шість; у ДП “Камінь-каширськагроліс” – п'ять (рис. 3). У Володимир-Волинському лісомисливському господарстві, Колківському, Турійському, Поліському лісгоспах та Шацькому УДЛГ – по чотири. На території інших лісгоспів також передбачені такі відпочинкові зони. Отже, в умовах сучасності, для лісів Волинської області характерним є активізація рекреаційного розвитку та застосування інтенсивної моделі рекреаційної трансформації. Прикладами такої моделі є новостворені рекреаційні пункти на території усієї області, а також ботанічний заказник загальнодержавного значення “Воротнів”, що розташований у 17 км від міста Луцьк та займає територію у 600 га.

Завдяки професійній діяльності лісівників Волині, багато місць для рекреаційного відпочинку отримали статус заказників, що, на нашу думку, є необхідною умовою розвитку моделі “оптимально-

рекреаційного лісу”, яка є надзвичайно важливою в сучасних урбогенних умовах (рис. 4–9).

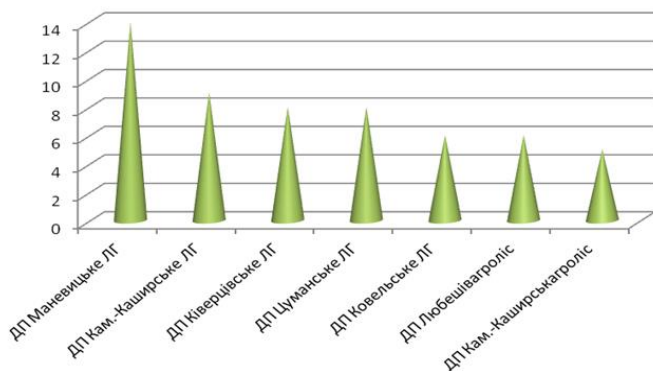


Рис. 3 – Діаграма кількості рекреаційних пунктів у лісгоспах області



Рис. 4 – Ставок у ботанічному заказнику “Воротнів”



Рис. 5 – Велодоріжка у ботанічному заказнику



**Рис. 6** – Прогулянкова доріжка рекреаційного пункту



**Рис. 7** – Зона відпочинку з альтанкою та мангалом

Гарно також облаштовано рекреаційний комплекс “Пролісок”, що знаходиться у Ківерцівському районі Волинської області (рис. 8–9).



**Рис. 8** – Рекреаційний комплекс з альтанками, лавочками, мангалами та розаріями



**Рис. 9** – Рекреаційний комплекс “Пролісок” з квітниками, альтанками, гойдалками

### **Висновки**

Аналіз рекреаційної трансформації лісів Волинської області свідчить про значну перевагу інтенсивної моделі розвитку лісопаркового поясу. Інтенсивне перетворення лісів у лісопарки на основі поглибленого благоустрою територій передбачає будівництво мостів, облаштування місць відпочинку з альтанками, гойдалками, мангалами, благоустроєм доріжок, прогулянкових стежок, велодоріжок, спортивних споруд, дитячих майданчиків тощо. Ця модель сприяє регулюванню рекреаційних навантажень та збереженню флори і фауни лісових масивів, значно підвищуючи фітомеліоративну функцію лісів та лісопарків. Необхідно зазначити, що найбільше рекреаційних пунктів знаходиться на території ДП “Маневицьке ЛГ”. Значно менша кількість рекреаційних пунктів у ДП “Володимир-Волинське ЛГ”, ДП “Колківське ЛГ” та ДП “Турійське ЛГ”.

Екстенсивний підхід до рекреаційної трансформації приміських лісів характеризується мінімальним благоустроєм та збереженням природи в первинному вигляді. Тому лісові масиви, які були включені в систему приміських парків і лісопарків, перетворювалися в лісопарки без проектування та теоретичного обґрунтування. У них відбувається збіднення рослинного і тваринного світу, низький рівень їх оздоровчих, пізнавальних та естетичних функцій, що унеможливило повноцінне забезпечення рекреаційних запитів населення та збереження насаджень в контексті сталого лісового розвитку.

### **Список посилань**

1. Атрохин, З.П., Курамышин, В.Я. (1991). Ландшафтное лесоводство. Экология, Москва, 176.
2. Кучерявий, В.П. (2003). Фітомеліорація. Світ, Львів, 539.

## APPLICATION OF LASER STRENGTHENING OF ROAD TRANSPORT DETAILS IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Y. Kovalchuk, I. Lisoviy\*

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine



### Key words:

method of surface laser treatment,  
laser strengthening,  
road transport details,  
wear resistance,  
laser exposure zone

### Article history:

Received 20.04.2021

Accepted 15.05.2021

### \*Corresponding author:

temp14053@gmail.com

### ABSTRACT

*The influence of laser hardening on the properties of the surface layer of iron-carbon alloys, from which various parts of motor transport used in agriculture are made, is analyzed. The peculiarities of the formation of the microstructure in the zone of laser influence for iron-carbon alloys as a result of application of the method of surface laser treatment are considered. It is determined that due to the possibility of austenite to have different effects on the wear resistance of alloys, the choice of hardening mode and the corresponding structural state in the laser zone should be made taking into account the operating conditions of a particular part. For example, for a pair of friction engine cylinder – compression ring residual austenite can contribute to better running of these parts. The distribution of microhardness along the depth of hardening of the corresponding samples of iron-carbon alloys during continuous laser treatment is shown. The dependence of the depth of the laser impact zone in the processed sample on the speed of laser processing is given. The speed of movement of the laser beam on the surface of the processed sample at which the melting zone appears is determined. It is shown that on the surface of the samples treated with a continuous CO<sub>2</sub>-laser, an inhomogeneous distribution of residual macrostresses is observed, and there is certain symmetry about the center of the band. As a result, it was obtained that laser hardening provides much better indicators of relative wear, coefficient of friction and the number of cycles before running on the corresponding friction pairs compared to conventional hardening. It is determined that iron-carbon alloys used by domestic manufacturers of road transport parts can be effectively treated with laser radiation.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.520>

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

## ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В АПК

Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий\*

Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна



### Ключові слова:

метод поверхневого лазерного оброблення, лазерне зміцнення, деталі автомобільного транспорту, зносостійкість, зона лазерного впливу

### Історія публікації:

Отримано 20.04.2021

Затверджено 15.05.2021

### \* Автор для

### листування:

temp14053@gmail.com

### АНОТАЦІЯ

Проаналізовано вплив лазерного зміцнення на властивості поверхневого шару залізвуглецевих сплавів, з яких виробляються різноманітні деталі автомобільного транспорту. Розглянуто особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для залізвуглецевих сплавів у результаті застосування методу поверхневого лазерного оброблення. Визначено, що внаслідок можливості аустеніту спричиняти різний вплив на зносостійкість сплавів, вибір режиму гартування та відповідного йому структурного стану в зоні лазерного впливу повинен проводитися із урахуванням умов експлуатації деталі. Так, для пари тертя циліндр двигуна – компресійне кільце залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню цих деталей. Показано розподіл мікротвердості за глибиною гартування зразків із залізвуглецевих сплавів під час оброблення лазером безперервної дії. Представлена залежність глибини зони лазерного впливу в оброблюваному зразку від швидкості лазерного оброблення. Визначено швидкість переміщення лазерного променя поверхнею оброблюваного зразка, за якої з'являється зона плавлення. Показано, що на поверхні зразків, що оброблені CO<sub>2</sub>-лазером безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових макронапружень. Лазерне гартування забезпечує кращі показники відносного зносу, коефіцієнта тертя та числа циклів до припрацювання пар тертя порівняно із звичайним гартуванням. Таким чином, залізвуглецеві сплави можуть ефективно оброблятися лазерним випромінюванням.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.520>

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

Серед виробників автомобільного транспорту, що активно використовується в сільському господарстві, не втрачає своєї актуальності питання покращення механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку деталей. Однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками, є забезпечення високих експлуатаційних характеристик деталей, які найбільше зношуються та виходять з ладу.

Деталі автомобільного транспорту, що виготовляються із чавуну, сталі 45 та інших залізвуглецевих сплавів, повинні задовольняти встановлені вимоги щодо міцності та зносостійкості.

Одним із методів зміцнення деталей автомобільного транспорту є поверхнєве лазерне оброблення. Щоб ефективно застосовувати цей метод, необхідно чітко уявляти всі внутрішні процеси в зоні лазерного впливу (ЗЛВ) зміцнюваних зразків, які відбуваються внаслідок лазерного оброблення.

Дослідження [1–5] лазерного оброблення деталей різної техніки в нашій державі мають локальний характер. Тому існує потреба в теоретичних та експериментальних дослідженнях на лазерних установках і комплексах та практичного встановлення результатів на спеціальному обладнанні і стендах, а також у полі. Все це вимагає значного фінансування, яке, фактично, відсутнє. Вченими із різних країн також проводилися теоретичні та експериментальні дослідження лазерного оброблення матеріалів [6–8]. Більшість досліджень мають несистемний характер. До кінця невирішеним залишається питання щодо узагальнення та систематизації результатів окремих досліджень.

**Мета дослідження** – забезпечення підвищення міцності та ресурсу виробітку деталей автомобільного транспорту шляхом застосування лазерного оброблення.

### **Матеріали і методи**

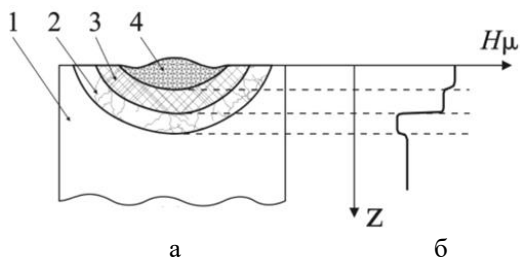
Питання використання методу поверхнєвого лазерного оброблення деталей автомобільного транспорту в сільському господарстві досліджувалося шляхом всебічного аналізу наукових та науково-технічних джерел інформації.

### **Результати дослідження та обговорення**

У поперечному перерізі зміцненої лазером смуги залізвуглецевих сплавів із використанням CO<sub>2</sub>-лазеру безперервної дії можна виділити кілька основних зон (рис. 1) [6]: зону оплавлення (зону гартування з рідкого стану), зону гартування, зону відпуску і вихідну структуру матеріалу. Деякі з цих зон в окремих випадках можуть бути відсутніми



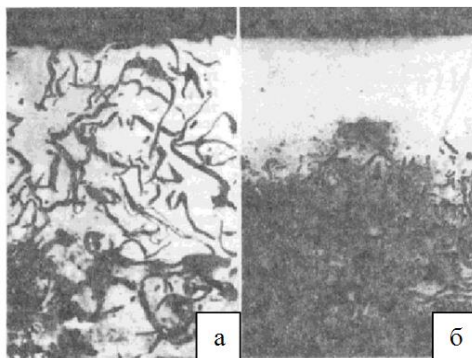
(наприклад, зона відпуску при гартуванні попередньо відпаленого металу або зона оплавлення при гартуванні без оплавлення поверхні).



**Рис. 1** – Схема поперечного перерізу зони лазерного оброблення (а) і розподілу в ній мікротвердості за глибиною (б):

1 – вихідний метал; 2 – зона відпуску; 3 – зона гартування;  
4 – зона гартування з рідкого стану

На рис. 2 [6] представлено характерний зовнішній вигляд оброблених лазерним випромінюванням доріжок без оплавлення та з оплавленням поверхні.



**Рис. 2** – Структура загартованих зон після оброблення  $\text{CO}_2$ -лазером зразків із сірого перлітного чавуну:

а – гартування без оплавлення (x50); б – гартування з оплавленням (x25)

У свою чергу кожна зона може містити декілька шарів та мати відмінності в мікроструктурі, в елементному складі, в співвідношенні складових фаз тощо. Дендритна будова зони оплавлення є типовою для сталей, дендрити ростуть перпендикулярно до межі поділу в напрямку відводу тепла в тіло досліджуваного зразка. При цьому

карбіди, зазвичай, розчиняються, тому визначальною структурною складовою є мартенсит.

Під час оплавлення чавунів графіт розчиняється в розплаві і після кристалізації формується дрібнодисперсна структура білого чавуну. Ступінь розчинення графіту залежить від його виду (пластинчастий, кульовий) і від тривалості термічного циклу. Виділення газів, адсорбованих графітом, часто призводить до утворення пор (як це видно на рис. 2, б). Також поширеними дефектами є тріщини.

У твердому стані зони гартування сталі неоднорідні за перерізом. Як впливає із загальних положень, в глибині поряд із мартенситом є елементи вихідної структури: ферит (для доевтектоїдної сталі) і цементит (для заевтектоїдної сталі), а ближче до поверхні після охолодження гомогенізованого аустеніту формується мартенсит і залишковий аустеніт.

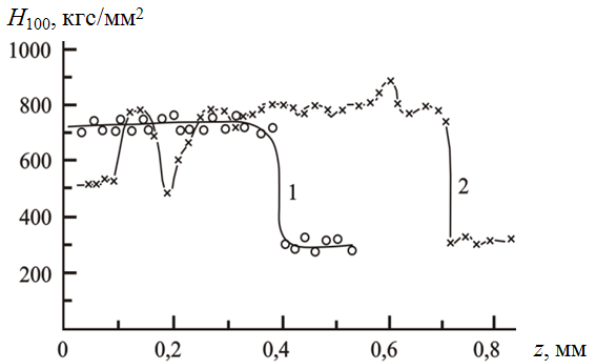
Перекристалізація супроводжується подрібненням зерна і гомогенізацією аустеніту, особливо якщо проводити її протягом достатнього часу без сильного перегріву, тобто із витримкою за температури, що вища за  $T_a$ . Розчинення надлишкового цементиту при перегріві заевтектоїдних сталей призводить до підвищення частки залишкового аустеніту і до зниження мікротвердості порівняно із зоною оптимального нагріву, що містить поряд із мартенситом нерозчинені карбіди.

Під час лазерного гартування без оплавлення фазові перетворення в матриці чавунів пов'язані з її структурою та зі ступенем її насиченості вуглецем. Найбільше матриця насичується вуглецем поблизу скупчень графіту, особливо, якщо вони мають розвинену поверхню і достатньо довгий час нагрівання. Мікротвердість в зоні загартування, зважаючи на велику неоднорідність структури, відрізняється великим діапазоном значень (від 3000 МПа до 9000 МПа), причому в феритних чавунах мікротвердість завжди менша, ніж у перлітних.

У першу чергу ступінь гартування характеризується твердістю матеріалу. Кожна зона обробленої лазерним випромінюванням смуги має свою мікротвердість, і, як правило, розподіл мікротвердості за глибиною матеріалу має вигляд, що зображений на рис. 1, б.

З метою оптимізації технологічного процесу гартування поверхні чавунів лазером, необхідно оцінити вплив тривалості дії випромінювання  $\tau$  на структуру та твердість цих сплавів.

Здійснюючи лазерне оброблення безперервним CO<sub>2</sub>-лазером, при зміні  $\tau$  для чавуну СЧ21 у межах 0,16–1,2 с, швидкість охолодження нагрітого об'єму металу перевищує критичну швидкість загартування, про що свідчить твердість отриманих у ЗЛВ структур (рис. 3) [6].

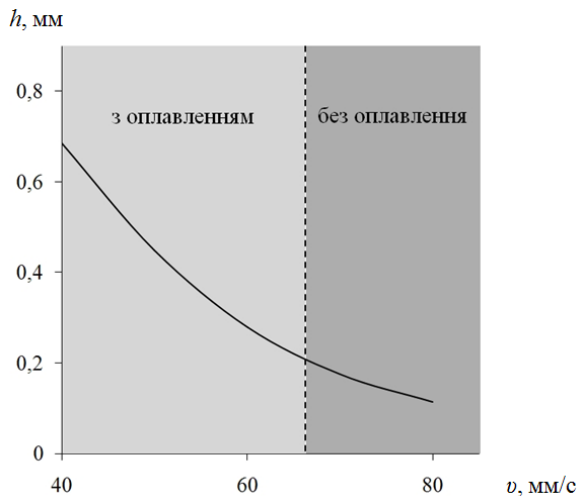


**Рис. 3** – Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерного впливу в чавуні СЧ21 ( $P_0 = 2,2$  кВт):  
1 –  $\tau = 0,16$  с; 2 –  $\tau = 1,2$  с

У структурі ЗЛВ чавуну СЧ21 на співвідношення аустенітної та мартенситної складових істотно впливає тривалість випромінювання. Зі збільшенням  $\tau$  у приповерхневому шарі та в глибині ЗЛВ з'являються окремі ділянки залишкового аустеніту з мікротвердістю  $H_{100} = 500\text{--}560$  кгс/мм<sup>2</sup>. У глибинних областях ЗЛВ аустеніт локалізується навколо включень фосфідної евтектики, тобто в найбільш збагачених вуглецем ділянках.

Необхідно зазначити, що структурна неоднорідність за глибиною ЗЛВ, яка виникає при збільшенні  $\tau$ , супроводжується нерівномірним розподілом твердості. На кривій мікротвердості, що відповідає  $\tau = 1,2$  с (рис. 3), є провали, пов'язані з попаданням індентора мікротвердоміру на аустенітні ділянки. Збільшення кількості залишкового аустеніту, яке спостерігається зі збільшенням  $\tau$ , ймовірно, пов'язане із великим насиченням твердого розчину вуглецем. Оскільки аустеніт може чинити різний вплив на зносостійкість, то вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися із урахуванням умов експлуатації конкретної деталі. У парі тертя, наприклад циліндр двигуна – компресійне кільце, залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню цієї пари. Для сталі 45 також може успішно застосовуватися лазерне гартування. За різних швидкостей лазерного оброблення відбувається вплив на різну глибину зміцнюваного зразка (рис. 4) [7].

У випадку збільшення швидкості оброблення ( $v > 66$  мм/с) та якщо задані параметри лазерного зміцнення, то оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається.



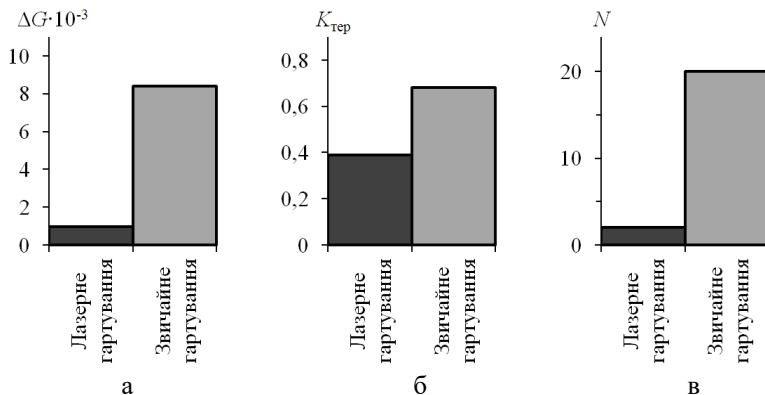
**Рис. 4** – Залежність глибини ЗЛВ сталі 45 від швидкості оброблення ( $P = 3,1$  кВт, поглинаюче покриття – аерозольна сажа)

Застосовування лазерного гартування дозволяє також підвищити зносостійкість пар тертя автомобільного транспорту, що працюють як в умовах сухого тертя, так і в абразивно-масляному середовищі. Зменшення зношування деталей після лазерного гартування обумовлене низкою факторів: великою твердістю поверхні, високою дисперсністю структури, збільшеними несучими властивостями поверхні, зменшеним коефіцієнтом тертя тощо.

На зносостійкість також впливає нерівномірність властивостей локальних ділянок обробленої поверхні. Зміцнення з перекриттям, а також нанесення окремих плям або доріжок лазерного зміцнення призводить до утворення знеміцнених та незміцнених ділянок у місцях, де метал опромінювався два та більше разів або зовсім не опромінювався. Ці ділянки можуть бути місцями релаксації залишкових структурних та термічних напружень. Крім того, часткове випаровування матеріалу в ЗЛВ викликає утворення мікрозаглиблень, в яких утримується мастило. Це також сприяє збільшенню зносостійкості під час роботи пар тертя.

За умови тертя-ковзання сталі 45, що загартована лазерним безперервним випромінюванням без оплавлення, по загартованій і низьковідпущеній сталі ШХ15 зношування й коефіцієнт тертя суттєво знижуються порівняно зі звичайним гартуванням сталі 45. Також після

застосування методу поверхневого лазерного оброблення різко зменшується час припрацювання пар тертя (рис. 5) [7].



**Рис. 5** – Порівняння відносного зносу (а), коефіцієнта тертя (б) та числа циклів до припрацювання пар тертя (в) для звичайного і лазерного гартування сталі 45 ( $P = 1$  кВт,  $v = 25$  мм/с)

Також необхідно урахувати, що на поверхні деталей, зокрема, зі сталі 45, що зміцнені безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням, виникають неоднорідно розподілені залишкові напруження. Розміри області зі зміненими напруженнями значно більші, ніж зона лазерного впливу, причому має місце певна симетрія відносно центра зміцненої смуги чи плями. Величина та знак залишкових напружень залежать від режимів лазерного оброблення, хімічного складу сталі та деяких інших факторів. Вони визначають такі властивості деталей автомобільного транспорту, як зносостійкість, втомні характеристики, залишкові деформації тощо.

### Висновки

Поверхнєве лазерне оброблення надає можливість забезпечити значне підвищення основних експлуатаційних характеристик виробів із залізовуглецевих сплавів. Внаслідок можливості аустеніту надавати різний вплив на зносостійкість сплавів, вибір режиму гартування та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі. Наприклад, для пари тертя циліндр двигуна – компресійне кільце залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню цих деталей.

Також розглянуто особливості формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для залізовуглецевих сплавів, показано розподіл

мікротвердості за глибиною гартування зразків та представлено залежність глибини зони лазерного впливу від швидкості лазерного оброблення. Для випадку збільшення швидкості лазерного оброблення ( $v > 66$  мм/с), при заданих параметрах лазерного зміцнення, оплавлення поверхні дослідного зразка не відбувається.

Як впливає з отриманих результатів, на поверхні зразків, що оброблені випромінюванням  $\text{CO}_2$ -лазера безперервної дії, спостерігається неоднорідний розподіл залишкових макронапружень, причому є певна симетричність щодо центра смуги.

Лазерне гартування забезпечує значно кращі показники відносного зносу, коефіцієнта тертя та числа циклів до припрацювання пар тертя порівняно із звичайним гартуванням. Отже, залізовуглецеві сплави, що використовуються вітчизняними виробниками деталей автомобільного транспорту для агровиробництв, можуть ефективно оброблятися лазерним випромінюванням, що, в свою чергу, може забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик цих виробів.

### Список посилань

1. Завойко, О.С. (2014). Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*, 15(4), 846–855.
2. Ковальчук, Ю.О., Лісовий, І.О., Шевчук, В.В. (2017). Особливості лазерного зміцнення деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*, 262, 238–245.
3. Черненко, В.С., Кіндрачук, М.В., Дудка, О.І. (2008). *Променеві методи обробки: навч. посібник*. Кондор, Київ, 166.
4. Ковальчук, Ю.О., Кравченко, В.В., Оляднічук, Р.В. (2017). Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*, 5, 92–99.
5. Ковальчук, Ю.О., Лісовий, І.О. (2018). Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 48, 54–61.
6. *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок*. (2009). Под ред. В.Я. Панченко. Москва, 664.
7. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. (2008). *Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов*. Под ред. А.Г. Григорьянца. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 664.
8. Rutkowski, D., Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERACTION OF SUNFLOWER STEMS WITH REAPER ROTORS

O. Nalobina<sup>1\*</sup>, N. Vasylichuk<sup>2</sup>, P. Ivashko<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>SSU “Rivne Technical Vocational College NUWEE”, Rivne, Ukraine



### Key words:

sunflower stem,  
laboratory equipment,  
stem height,  
slope of the stem,  
seed loss

### Article history:

Received 15.04.2021

Accepted 12.05.2021

### \*Corresponding author:

o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

### ABSTRACT

*In the process of sunflower harvesting with traditional harvesters, the basket is cut together with part of the stem. Due to the fact that the baskets come into the area of the auger with a part of the stems, we have seed losses and clogging of the moving parts of the reaper. The need to clean them leads to stops and, consequently, increase the time of harvesting. In order to eliminate the outlined shortcomings, an additional working body of the reaper (rotor) was developed and manufactured. The configuration of this working body and the geometric parameters are substantiated by the authors theoretically. In order to verify the obtained theoretical results, as well as to establish a rational speed of the rotors, it was necessary to conduct a series of experimental studies. This article describes the laboratory equipment developed and manufactured by the authors to study the patterns of interaction of sunflower stems with rotors and to establish the impact on this process of stem diameter, rotor angle to the horizon and their frequency. Based on the analysis of the study results, it was found that to minimize the length of the stem segment, which falls with the basket in the area of the auger, you need to set the axis of the rotors at an angle of 10–15 degrees to the field surface, the rotational speed of rotors should be 300–350 min<sup>-1</sup>. If the angle of inclination is increased or the axes of the rotors are installed parallel to the horizontal surface, the manifestations of clogging of the rotor channel, deflection of stems in the opposite direction to their movement are established, which in real operating conditions will lead to seed loss.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.493>

УДК 631.35

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СТЕБЕЛ  
СОНЯШНИКУ ІЗ РОТОРАМИ ЖАТКИ****О.О. Налобіна<sup>1\*</sup>, Н.В. Васильчук<sup>2</sup>, П.Г. Івашко<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природо-користування, Рівне, Україна<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>3</sup>ВСП "Рівненський технічний фаховий коледж НУВГП", Рівне, Україна**Ключові слова:**

стебла соняшнику,  
лабораторна установка,  
висота стебла,  
нахил стебла,  
втрати насіння

**Історія публікації:**

Отримано 15.04.2021

Затверджено 12.05.2021

**\* Автор для****листування:**

o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

**АНОТАЦІЯ**

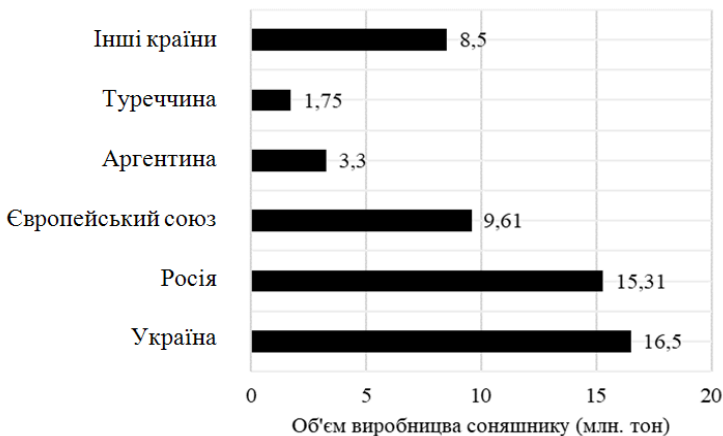
У процесі збирання соняшнику традиційними жатками зрізування корзинок відбувається разом із частиною стебла. Оскільки у зону дії шинка корзинки надходять із частиною стебел, маємо втрати насіння та засмічення рухомих елементів жатки. Потреба в їхньому очищенні призводить до зупинок і збільшення тривалості збирання. Із метою усунення зазначених недоліків розроблено та виготовлено додатковий робочий орган жатки – ротор. Конфігурація робочого органу та геометричні параметри авторами обґрунтовані теоретично у попередніх працях. З метою перевірки отриманих теоретичних результатів та встановлення раціональної частоти обертання роторів були проведені експериментальні дослідження. У статті описане розроблене лабораторне устаткування для дослідження закономірностей взаємодії стебел соняшнику із роторами та встановлення впливу на цей процес діаметра стебел, кута нахилу роторів та частоти їх обертання. Для мінімізації довжини частини стебла, що потрапляє в зону дії шинка, потрібно ротори встановлювати під кутом 10–15 град. до поверхні поля, а частота їх обертання має бути 300–350 хв<sup>-1</sup>. За умови збільшення кута нахилу чи встановленні роторів паралельно горизонтальній поверхні матиме місце забивання їх каналу та відхилення стебел у протилежному напрямку до їх переміщення, що зумовить втрату насіння.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.493>



### Стан питання та постановка проблеми

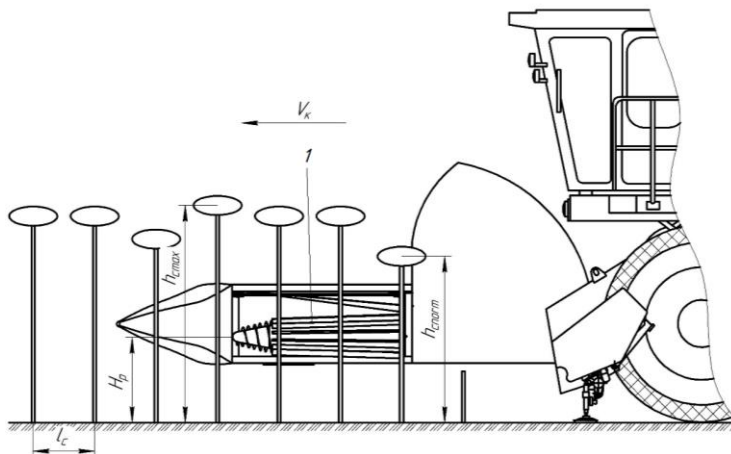
Соняшник – це однорічна трав'яниста рослина родини айстрових, яка є однією із найважливіших олійних культур. Згідно даних міжнародної служби статистики Statista Україна є країною із найбільшим обсягом виробництва насіння соняшнику в 2019–2020 рр. (рис. 1) [1].



**Рис. 1** – Світове виробництво соняшника згідно даних Statista [1]

Одним із найбільш трудомістких процесів виробництва соняшника є збирання урожаю. Для збирання цієї культури застосовують традиційні зернозбиральні комбайни, на які навішують спеціалізовані пристосування – жатки. Технологічний процес збирання передбачає зрізування корзинок соняшнику. Разом із корзинками зрізується також частина стебла (рис. 2). Довжина частин стебел, які разом із корзинками надходять у зону дії шнека, неоднакова та залежить від висоти розміщення корзинок соняшнику відносно поверхні ґрунту. Це призводить до значного засмічення рухомих конструктивних елементів жатки, зменшення пропускної здатності та регулярних зупинок для очищення і обслуговування робочих вузлів жатки [2].

Із метою усунення зазначених недоліків розроблено конструкцію роторів, які рекомендовані для встановлення в нижній частині жатки. Метою цієї модернізації є забезпечення зрізування корзинок максимально близько до їхньої основи, що зменшить засмічення робочих вузлів жатки, а також подрібнення стебел, яке, в свою чергу, усуне необхідність застосування мульчера [3].



**Рис. 2** – Схема збирання соняшнику жаткою, що оснащена роторами:  
1 – ротори

Дослідженням процесу збирання соняшнику і технічних засобів для його проведення присвячено наукові праці Шафоростова В.Д. [2], Gonulol E. [4], Dalmis I.S., Kayisoglu B. [5, 6], Старцева А.С. [7], Кустова С.О. [8] та інших вчених.

У науковій праці [4] авторами досліджено процес подрібнення стебел соняшнику після проведення збиральних робіт. Науковці дослідили три різні методи подрібнення стебел. Експериментальним шляхом встановлено, що процес подрібнення, ефективність якого оцінюється величиною частинок стебла, доцільно проводити пристосуванням, яке оснащено роторними робочими органами.

Для подрібнення стебел соняшнику в процесі збирання Dalmis I.S. та Kayisoglu B. [5] запропонували встановити подрібнювальний апарат під жаткою зернозбирального комбайна. Авторами в процесі експериментальних досліджень обґрунтовано форму ножів подрібнювального апарата. Також встановлено, що використання ріжучого апарата дозволяє подрібнити стебла ще під час збирання і, відповідно, скоротити тривалість збиральних робіт.

Dalmiş İ.S. та Kayışođlu B. [6] також представили результати експериментальних досліджень ефективності подрібнювача стебел соняшнику. Дослідниками встановлено витрати пального та оцінено показник енергоспоживання подрібнювача. Під час польових випробувань встановлено раціональну швидкість руху комбайна та частоту обертання лопатей подрібнювального апарата.

Старцев А.С. [7] проаналізував роботу зернозбирального комбайна, який використовується для збирання соняшнику, як складної технічної системи та базуючись на засадах системного аналізу встановив ступінь впливу елементів системи на величину втрат насіння під час проведення збиральних робіт. Науковцем запропоновано алгоритм визначення втрат насіння під час використання зернозбирального комбайна, який переобладнано для збирання соняшнику. Також обґрунтовано математичні моделі, які описують технологічні процеси збирання стеблостою та розкривають закономірності формування втрат насіння.

Кустов С.О. у своїй праці [8] обґрунтував математичні залежності, які описують рух лопаті мотовила, встановлюють умови для визначення значення напрямку швидкості під час її контакту з соняшником, а також вплив параметрів мотовила на показники якості його роботи.

Abd-El-Maksoud M.A.F., El-Sayed G.H. [9] представили результати експериментальних досліджень відриву корзинки від стебла соняшнику за умови різної вологості стебел та швидкості руху комбайна. Результати досліджень науковцями покладено в основу модифікації машини для збирання цієї культури. Авторами також встановлено зворотній кореляційний зв'язок між довжиною частинок стебел, які разом із корзинками надходять до шнека, і втратами насіння. Також встановлено, що втрати насіння зростають із збільшенням швидкості руху комбайна.

У роботі Чаплигіна М., Безпалової О., Подзорової М. [10] викладено результати випробувань пристосувань для збирання соняшнику, що відрізняються дизайном, кількістю рядків, які збираються, та наявністю подрібнювачів стебла в умовах станції випробування машин. Авторами також проаналізовано конструкції пристосувань та встановлено, що вони відповідають показникам призначення, надійно та ефективно виконують технологічний процес. Пристосування для збирання соняшнику, які випробовувалися, були виготовлені на заводах сільськогосподарського машинобудування в Росії та Угорщині.

Ochildiev O., Fozilov G., Achildiev S. у своїй науковій праці [11] представили результати експериментальних досліджень роботи комбайна, що оснащений GPS-пристроями та давачами керування, які підвищують ефективність його роботи. Авторами також доведено ефективність застосування GPS-пристроїв та давачів керування під час збирання соняшнику. ГІС-технології (ГІС – це геоінформаційні

системи), які використовувалися на комбайнах для збирання соняшнику, дозволили зменшити втрати насіння.

Шафоростов В.Д., Макаров С.С. Погорелов В.Н. у науковій праці [12] представили результати досліджень, що спрямовані на удосконалення робочих органів жатки для збирання соняшнику. Дослідниками розв'язана практична задача розширення діапазону висоти стебел, що підлягають зрізуванню, та забезпечення зменшення втрат насіння незалежно від початкової висоти стебла.

İnce A. та Uğurluay S. у своїй науковій праці [13] досліджували механічні характеристики стебел соняшнику в польових умовах після взаємодії із робочими органами жаток. Були визначені згинальні напруження, модуль пружності, максимальне напруження та питома енергія зсуву для стебел. Експериментальним шляхом встановлено, що для стебел соняшника є прямий кореляційний зв'язок між величинами напруження згину, силою зсуву під час зрізування стебел та їх вологістю. Результати досліджень доцільно використовувати під час організації робіт із подрібнення стебел соняшнику з найменшими енергетичними витратами.

Аналіз результатів представлених досліджень дозволяє окреслити декілька їх напрямів:

- 1) розроблення конструктивних рішень, що спрямовані на забезпечення процесу подрібнення стебел під час збиральних робіт;
- 2) обґрунтування напрямів модернізації робочих органів жаток для збирання соняшнику з метою зменшення втрат насіння.

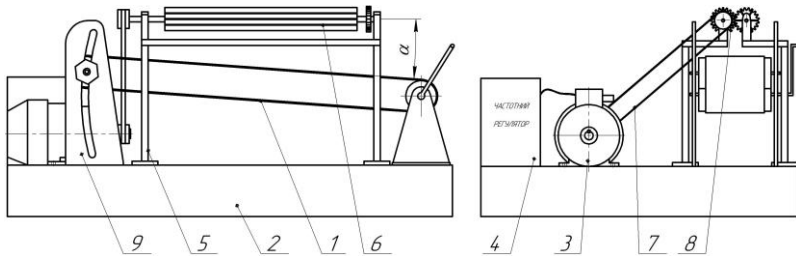
Запропонована авторами конструктивна розробка [14] потребує обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів, що зумовлює необхідність проведення низки теоретичних та експериментальних досліджень.

**Мета дослідження** – експериментальним шляхом встановити раціональні значення кута нахилу осі ротора до поверхні ґрунту та частоти його обертання.

### **Матеріали і методи**

Відповідно до запропонованих авторами [14] конструктивних змін, у жатці для збирання соняшнику передбачено встановлення роторів із фігурною зовнішньою поверхнею, які дозволяють регулювати висоту зрізування корзинок залежно від висоти стебла за рахунок затягування високих стебел до рівня найнижчих корзинок (рис. 2).

Для проведення експериментальних досліджень процесу взаємодії стебел соняшнику із роторами було розроблено та виготовлено лабораторну установку (рис. 3).



**Рис. 3** – Схема лабораторної установки:

- 1 – транспортер; 2 – рама; 3 – електродвигун А02-31-4;
- 4 – частотний регулятор Telemecanique Altivar 31;
- 5 – стійки кріплення роторів; 6 – ротори; 7 – пасова передача;
- 8 – зубчаста передача; 9 – регулятор нахилу транспортера

Лабораторна установка містить транспортер, який закріплено на рамі, в якому передбачена можливість зміни кута нахилу до горизонту. Стрічка транспортера оснащена тримачами для стебел, які являють собою воронку із дном, що легко витискається стеблом за умови його опускання під впливом виступів ротора.

На рамі змонтовано асинхронний трифазний електродвигун А02-31-4 потужністю 2,2 кВт та частотою обертання 1430 хв<sup>-1</sup>. Частоту обертання електродвигуна можна змінювати із кроком 28,6 хв<sup>-1</sup> за допомогою частотного регулятора Telemecanique Altivar 31. На рамі також змонтовані стійки для закріплення роторів. Крутний момент на вал одного із роторів передається із вала двигуна через пасову передачу. Крутний момент на вал другого ротора передається через зубчасту передачу. Крім того, установка містить регулятор, який призначено для зміни кута  $\alpha$  нахилу транспортера відносно осі роторів.

Для проведення досліджень використовували стебла сояшинику однакової довжини (для кожного конкретного досліді), які закріплювали на стрічці транспортера у кількості 10 штук (рис. 4). Середній діаметр стебел на стрічці становив: 6,7 см; 4,8 см; 2,9 см. Стебла взаємодіяли з роторами за умов, що кут нахилу роторів до горизонту становив: 50°, 40°, 30°, 20°, 10°, 0°.

З метою оцінювання отриманих числових характеристик використано методику, яка запропонована для оцінювання величин, що отримані внаслідок проведення обмеженої кількості дослідів [16].

Оцінка математичного очікування:

$$\tilde{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (1)$$

де  $X_i$  – значення, яке приймає шуканий параметр у  $i$ -му досліді;  $n$  – кількість дослідів.



Рис. 4 – Лабораторна установка

Оцінка дисперсії:

$$\tilde{D} = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{m})^2 \right). \quad (2)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma[\tilde{m}] = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (3)$$

Ймовірність того, що оцінка математичного очікування відхиляється від свого математичного очікування менше, ніж на  $\varepsilon$ :

$$p \left\{ |\tilde{m} - m| < \varepsilon \right\} \approx 2\Phi \left( \frac{\varepsilon}{\sigma[\tilde{m}]} \right), \quad (4)$$

де  $\Phi(x)$  – функція Лапласа;  $\varepsilon$  – похибка досліджень.

Похибка досліджень визначається таким чином:

$$\varepsilon \approx \frac{s_c}{X_{исер}}. \quad (5)$$

Надійність досліджень оцінювали за формулою:

$$p \left\{ |\tilde{m} - m| < \varepsilon \right\} \approx 2\Phi \left( \frac{\varepsilon}{\sigma[\tilde{m}]} \right). \quad (6)$$

Для визначення відсотка зменшення довжини стебел внаслідок їхньої взаємодії з роторами, як функції від діаметра стебел і кута нахилу роторів до горизонту, проведено дослідження із використанням методу математичного планування експерименту. Для цього були обрані фактори, які впливають на процес транспортування стебел роторами з одночасним затягуванням їх вниз: діаметр стебла соняшника  $D_c$  (мм); кут нахилу роторів  $\alpha_p$  (град).

Вихідний параметр  $Y$  (%) – це зменшення довжини верхньої частини стебла, що розташована над роторами, відносно початкової, яка фіксувалася на початку каналу, що утворений виступами ротора.

У таблиці 1 представлені результати кодування факторів, а в таблиці 2 – план-матриця експерименту.

**Таблиця 1** – Результати кодування факторів

Фактор	Натуральне значення	Кодоване значення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				натуральні			кодовані		
				верхні	нульові	нижні	верхні	нульові	нижні
Діаметр стебла соняшнику, см	$D_c$	$x_1$	1,9	6,7	4,8	2,9	+1	0	-1
Кут нахилу роторів, град	$\alpha_p$	$x_2$	15	40	25	10	+1	0	-1

**Таблиця 2** – План-матриця експерименту

Номер досліджу	Значення кодованих факторів		Результати дослідів		
	$x_1$	$x_2$	$\bar{Y}_{U1}$	$\bar{Y}_{U2}$	$\bar{Y}_{e_i}$
Частота обертання роторів 956,4 хв <sup>-1</sup>					
1	-1	-1	36,4	35,8	36,1
2	+1	-1	24,7	25,7	25,2
3	-1	+1	12,8	13,4	13,1
4	+1	+1	7,9	8,1	8,0
Частота обертання роторів 314,6 хв <sup>-1</sup>					
1	-1	-1	26,7	26,2	26,45
2	+1	-1	15,8	16,1	15,95
3	-1	+1	5,9	6,1	6,0
4	+1	+1	1,2	1,0	1,1

З метою перевірки відтворюваності дослідів використовували критерій Корхена. На адекватність рівняння регресії перевіряли за критерієм Фішера. Оцінювання значущості коефіцієнтів регресії виконувалося за допомогою критерію Стьюдента. Розрахунки проводили згідно методики, що представлена у праці [15].

### Результати дослідження та обговорення

Розрахунки, що виконані за залежностями (1)–(6) дозволили встановити надійність досліджень ( $p = 0,95$ ). Такий результат показує, що дослідження проведені за достатньої кількості варіантів дослідів і високої їхньої надійності. За результатами експериментальних досліджень отримані рівняння регресії:

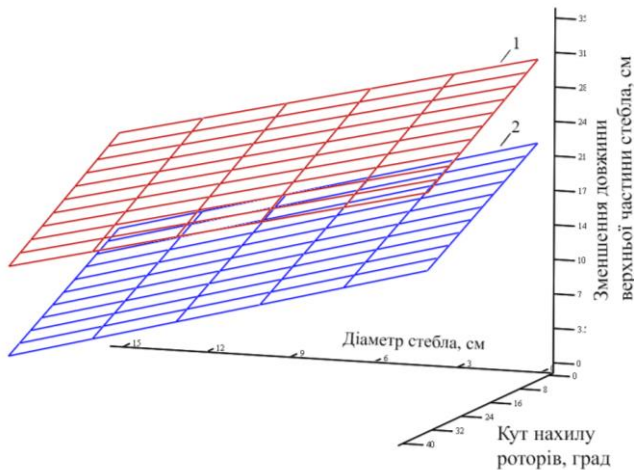
- для частоти обертання роторів  $956,4 \text{ хв}^{-1}$ :

$$y = 30,954 - 0,671 \cdot D_c - 0,278 \cdot \alpha_p; \quad (7)$$

- для частоти обертання роторів  $314,6 \text{ хв}^{-1}$ :

$$y = 22,433 - 0,75 \cdot D_c - 0,258 \cdot \alpha_p. \quad (8)$$

Графічна інтерпретація рівнянь регресії представлена на рис. 5.

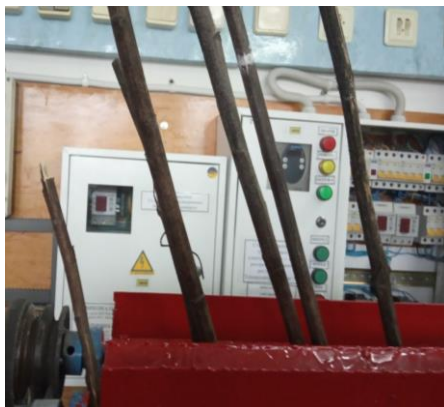


**Рис. 5** – Залежність величини зменшення довжини стебла від його діаметра та кута нахилу роторів за умови, що частота обертання роторів:  
1 –  $314,6 \text{ хв}^{-1}$ ; 2 –  $956,4 \text{ хв}^{-1}$

Під час проведення дослідів спостерігалось скупчення стебел на виході з каналу роторів за умови, що кут їхнього нахилу становив  $50^\circ$  та  $40^\circ$ , а середній діаметр стебел у каналі –  $6,7 \text{ см}$  і  $4,8 \text{ см}$ . При цьому



стебла ламалися. Причому після зламу верхівка стебла нахилилася у напрямку, що протилежний до напрямку їх руху. Тобто у реальних умовах експлуатації жатки будемо мати нахил стебел у напрямку, який протилежний до зони дії шнека, що недопустимо через значні втрати насіння. Якщо кут нахилу роторів становить  $10^\circ$ , а частота обертання роторів  $314,6 \text{ хв}^{-1}$ , тоді стебла нахилиються у напрямку руху (рис. 6), що сприятиме потраплянню всіх корзиночок у зону дії шнека.



**Рис. 6** – Положення стебел на виході з каналу у випадку, коли кут нахилу роторів  $10^\circ$ , а частота їх обертання  $314,6 \text{ хв}^{-1}$

### Висновки

Під час експериментальних досліджень доведена доцільність додаткового оснащення жатки для збирання соняшнику роторами. Вісь ротора повинна бути нахилена до горизонту на кут  $10\text{--}15^\circ$ . За цих умов стебла при проходженні через канал, який утворений роторами, затягуються їхніми виступами вниз (в середньому довжина стебла, яка знаходиться над роторами зменшується на  $27,6\%$ ) та підходять до виходу з каналу нахиленими у напрямку руху. Таке положення стебел сприятиме потраплянню усіх корзиночок у зону дії шнека. Ці твердження є справедливими за умови, що частота обертання роторів становить  $314,6 \text{ хв}^{-1}$ .

У випадку збільшення частоти обертання роторів до  $956,4 \text{ хв}^{-1}$  від  $38\%$  до  $59\%$  стебел відхиляється у протилежному напрямку до напрямку їхнього переміщення, що в реальних умовах відповідає відхиленню в протилежному напрямку до зони дії шнека, а це спричиняє втрати насіння.

**Список посилань**

1. Production volume of sunflower seed in major producer countries in 2019/2020. Statista. <https://www.statista.com/statistics/263928/production-of-sunflower-seed-since-2000-by-major-countries/>
2. Шафоростов, В.Д., Макаров, С.С. (2007). Потери урожая подсолнечника при уборке. Масличные культуры, 1, 95–96.
3. Васильчук, Н.В., Налобіна, О.О. (2017). Жатка для збирання соняшнику. Патент №1181445, Україна.
4. Gonulol, E., Dalmis, I.S., Kayisoglu, B., Bayhan, Y. (2009). The evaluation of alternative stalk chopping methods in sunflower farming. *African Journal of Agricultural Research*, 4(12), 1398–1403.
5. Dalmis, I.S., Kayisoglu, B., Bayhan, Y., Ulger, P., Toruk, F., Durgut, F. (2013). Development of a chopper unit for chopping of sunflower stalk during harvesting by combine harvester. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19(5), 1148–1154.
6. Dalmis, I.S., Kayisoglu, B., Bayhan, Y., Ulger, P., Toruk, F. (2013). Determination of the effects of rotation speed and forward speed on combine harvester driven stalk chopper assembly operating performance. *Tarim Bilimleri Dergisi*, 19(1), 54–62. [https://doi.org/10.1501/Tarimbil\\_0000001230](https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001230)
7. Старцев, А.С. (2018). System analysis of combined harvester work at sunflower harvesting. *Agrarian Scientific Journal*, 12, 78–80.
8. Кустов, С.О. (2013). Моделивання руху лопаті удосконаленого мотовила для збирання соняшнику. *Сільськогосподарські машини*, 26, 81–85.
9. Abd-El-Maksoud, M.A.F., El-Sayed, G.H. (2009). Modifying and testing a header system for cereal crop harvester to be suitable for sunflower harvesting. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 773–776.
10. Chaplygin, M., Bepalova, O., Podzorova, M. (2019). Results of tests of devices for sunflower harvesting in economic conditions. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019 E3S Web Conf.*, 126, 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600063>
11. Ochildiev, O., Fozilov, G., Achildiev, Sh., Karimov, M., Ashurov, N. (2021). Indicators of the combine equipped with GPS receiver in sunflower harvesting. In: *Annual International Scientific Conference on Geoinformatics – GI 2021: “Supporting sustainable development by GIST”*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122707002>
12. Shaforostov, V.D., Makarov, S.S., Pohorelov, V.N. (2015). Reaper to breeding combine for sunflower harvesting. *Oil crops. Scientific and Technical Bulletin VNIIMK*, 2, 103–105.
13. İnce, A., Uğurluay, S., Güzel, E., Özcan, M. (2015). Bending and shearing characteristics of sunflower stalk. *Biosystems Engineering*, 175–181.
14. Васильчук, Н.В., Налобіна, О.О. (2017). Жатка для збирання соняшнику. Патент №116226, Україна.
15. Хайлис, Г.А., Ковальов, М.М. (1994). Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. *Колос*, Москва, 169.
16. Вентцель, Е.С., Овчаров, Л.А. (2004). Теория вероятностей и ее инженерные приложения. *Наука*, Москва, 528.

## MODELING OF MOVEMENT OF DESIGN ELEMENTS OF SCISSOR-TYPE GRAIN SEPARATOR

V. Olkhovskyi, I. Dudarev\*

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### Key words:

oscillating movement of sieve, separator parameters, separator drive mechanism, spring support of separator, movable frame of separator

### Article history:

Received 10.03.2021

Accepted 10.05.2021

\*Corresponding author:  
i\_dudarev@ukr.net

### ABSTRACT

*Cleaning of grain from non-grain and grain impurities with simultaneous sorting is a mandatory technological operation, which is carried out after grain harvesting, as well as during storage and processing. Separators of various designs are used for cleaning of grain mass, but separators with flat and cylindrical sieves are the most common. Separators with flat sieves have the advantage that the entire surface of such sieves is used during separation. However, one of the disadvantages of flat sieves is the large size. Therefore, the search for design solution for the compact arrangement of flat sieves in the separator is an urgent task. Separator of scissor type is a separator with a compact arrangement of sieves, in which sieves are located on the separating sections connected crosswise. For segregation of the grain mass on the separator sieves it is necessary to oscillate the separator sieves along the vertical line. This process intensifies the grain cleaning and sorting and effectively cleaning of the sieve holes from clogging by rubber balls. Modeling of the oscillating movement of the design elements of the scissor-type grain separator using the basic provisions of theoretical mechanics allowed us to establish the motion law of the separator movable frame. The obtained equations allow us to calculate and choose rational parameters and operating regimes of the scissor-type grain separator, especially parameters of drive mechanism. Substantiating the parameters of the separator according to the simulation results, in particular the value of the stiffness of the spring supports and the angular velocity of the eccentric, it is necessary to ensure at least one complete oscillation of the movable frame of separator between its contacts with the slider, which will create favorable conditions.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.494>

УДК 621.928:167

**МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ЗЕРНОВОГО СЕПАРАТОРА НОЖИЧНОГО ТИПУ****В.О. Ольховський, І.М. Дударев\***

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**

коливальний рух  
решета,  
параметри сепаратора,  
привод сепаратора,  
пружна опора  
сепаратора,  
рухома рама  
сепаратора

**Історія публікації:**

Отримано 10.03.2021

Затверджено 10.05.2021

**\* Автор для****листування:**

i\_dudarev@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

Очищення зерна від сміттєвих (незернових) і зернових домішок із одночасним сортуванням є обов'язковою технологічною операцією, яка проводиться після його збирання, а також під час зберігання та перероблення. Для сепарування зернової маси використовують сепаратори різних конструкцій, але найбільш поширеними є сепаратори з плоскими та циліндричними решетами. Сепаратори із плоскими решетами мають перевагу, оскільки під час сепарування уся поверхня таких решіт використовується. Разом із тим, одним із недоліків таких решіт є великі габаритні розміри. Тому пошук конструктивних рішень компактного розташування плоских решіт в сепараторі є актуальним завданням. Серед таких конструкцій із компактним розташуванням решіт можна виокремити сепаратори ножичного типу, в яких решета розташовані на сепарувальних секціях-важелях, що з'єднані навхрест. Для забезпечення постійного розширювання зернової маси на решетах такого сепаратора, що інтенсифікує сепарування, а також для ефективного очищення отворів решіт від забивання за допомогою гумових кульок, необхідно забезпечити коливання решіт вздовж вертикалі. Моделювання коливального руху конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу із використанням основних положень теоретичної механіки дозволило встановити закони руху повзунка та рухомої рами сепаратора. Отримані залежності дозволяють розрахувати та обрати раціональні параметри і режими роботи механізму приводу сепаратора ножичного типу.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.494>

### Стан питання та постановка проблеми

Однією із основних технологічних операцій післязбирального оброблення зернової маси є її очищення від сміттєвих (незернових) та зернових домішок із одночасним сортування [1, 2]. Також сепарування зерна періодично проводиться під час його зберігання та перед переробленням [3–6]. Цю операцію проводять на сепараторах, які містять плоскі решета з круглими, довгастими або трикутними отворами, що здійснюють коливальний рух за різними траєкторіями, та на циліндричних сепараторах [7–9]. Перевагою сепараторів із плоскими решетами, у порівнянні із циліндричними, є те, що уся поверхня плоского решета ефективно використовується (заповнена зерновою масою) [10]. Разом із тим, плоскі решета мають великі габаритні розміри, тому пошук конструктивних рішень компактного розташування плоских решіт в сепараторі є актуальним завданням. Серед конструкцій із компактним розташуванням решіт можна виокремити сепаратори ножичного типу, в яких решета розташовані на сепарувальних секціях-важелях, що з'єднані навхрест [11–14]. У цих сепараторах розташування решіт не дозволяє забезпечити коливання одночасно усіх решіт за траєкторією, яка б знаходилася у площині кожного решета. Тому одночасні однакові коливання усіх решіт можливі лише вздовж вертикалі. У результаті таких коливань зернова маса буде підкидатися на решетах, що сприятиме її розшаруванню та унеможливить утворення застійних зон. Крім того, такі коливання забезпечують підстрибування гумових кульок, які розташовані у просторі між решетом та піддоном, що очищають отвори решіт від забивання складовими зернової маси.

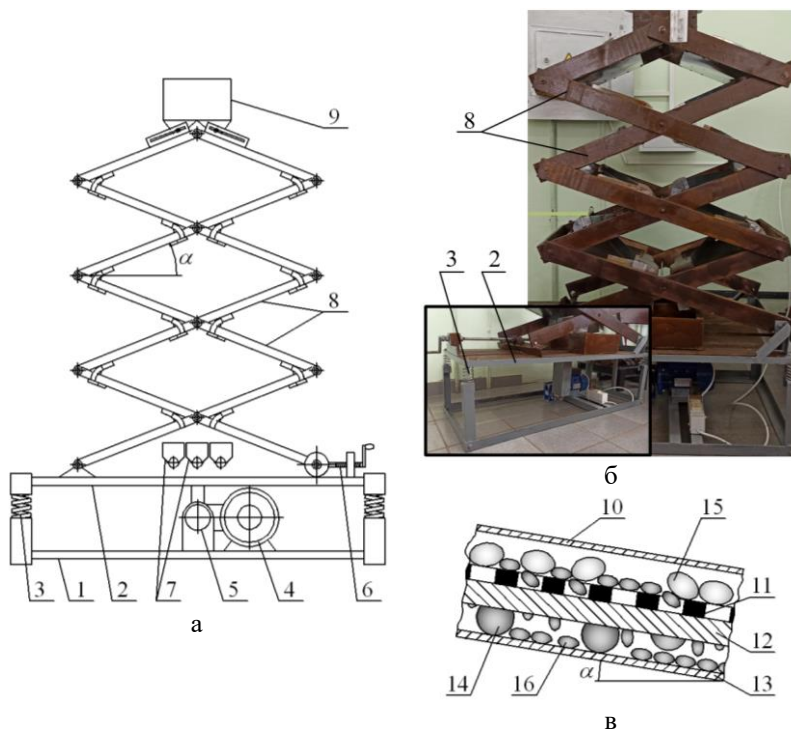
Переважає більшість наукових досліджень процесу сепарування зернових мас та різних сипких матеріалів присвячена моделюванню цього процесу та визначенню раціональних режимів роботи і параметрів сепараторів, за яких буде забезпечена ефективна робота сепаратора [15–31]. Також у наукових працях представлені результати визначення впливу фізико-механічних властивостей сипких матеріалів на процес сепарування [32]. Особливу увагу у своїх працях науковці приділяють дослідженню впливу коливань решіт за різними траєкторіями (колова, еліптична тощо) на довжину шляху [33–38], який проходить частинка сипкого матеріалу решетом, оскільки зі збільшенням довжини шляху зростає ймовірність попадання частинки в отвір решета і, відповідно, ефективніше проходить сепарування. Конструктивне забезпечення коливального руху решіт сепаратор ножичного типу має свої особливості, що потребують додаткових досліджень з метою визначення раціональних параметрів елементів

конструкції та встановлення закону їх руху. Тому дослідження, що спрямовані у цьому напрямі, є надзвичайно актуальними.

**Мета дослідження** – моделювання руху конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу.

### Матеріали і методи

Дослідження передбачали моделювання руху конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу (рис. 1) із використанням основних положень теоретичної механіки [39, 40].



**Рис. 1** – Зерновий сепаратор ножичного типу (а) і (б) та поздовжній розріз пересипної полиці (в):

- 1 – нерухома рама; 2 – рухома рама; 3 – пружні опори; 4 – привод;
- 5 – ексцентрик; 6 – передача “гвинт-гайка”; 7 – контейнери;
- 8 – сепарувальні секції-важелі; 9 – бункер; 10 – кришка; 11 – решето;
- 12 – перегородка; 13 – піддон; 14 – гумова кулька;
- 15 – крупна фракція зерна; 16 – дрібна фракція зерна (домішки)

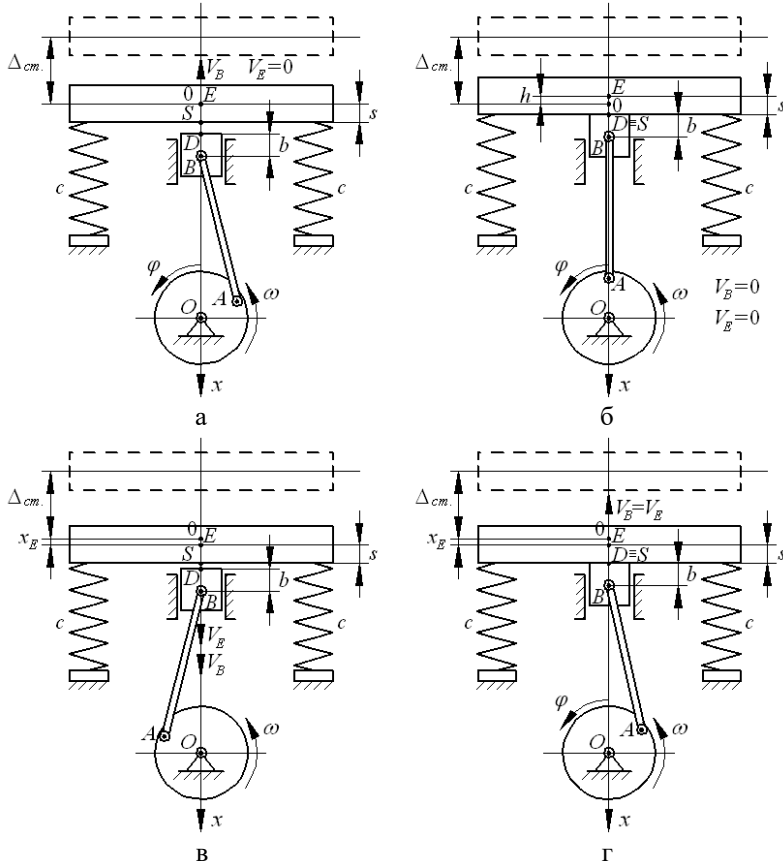
Усі розрахунки за розробленою математичною моделлю, а також побудова графічних залежностей відбувалися із використанням системи комп'ютерної математики MathCAD14.

Математична модель розроблена для сепаратора, що містить нерухому раму, на якій розташовано привод, що забезпечує можливість коливального руху рухомої рами із сепарувальними секціями-важелями. Коливальний рух рухомої рами з секціями-важелями відбувається за рахунок періодичної дії на рухому раму повзунка, що через шатун з'єднаний з ексцентриком, привод якого розташований на нерухомій рамі сепаратора. Зворотньо-поступальний рух повзунка вздовж вертикалі забезпечують спрямовувачі. Рухома рама розташована на чотирьох пружних опорах. Сепарувальні секції-важелі з'єднані між собою нахрест (по типу "ножиці"). Над верхніми секціями-важелями розташовано бункер із двома вивантажувальними отворами. Сепарувальні секції-важелі містять пересипні полиці, кожна з яких обладнана кришкою, плоским решетом та піддоном. Між плоским решетом і піддоном встановлені поздовжні та поперечні перегородки, які утворюють секції прямокутної форми, в кожній з яких розміщені гумові кульки. Внаслідок коливального руху секцій-важелів гумові кульки підстрибують та очищують отвори решіт, виштовхуючи із них зернини та домішки, які застрягли в отворах. Пересипні полиці з'єднані між собою за допомогою рукавів, через які з решета на решето та із піддона на піддон переміщуються відокремлені складові зернової маси. У конструкції сепаратора передбачена можливість зміни кута  $\alpha$  встановлення решіт, що відбувається за допомогою передачі "гвинт-гайка". У сепараторі також передбачено контейнери для фракцій зерна та/або домішок.

### Результати дослідження та обговорення

Розглянемо коливальний рух рухомої рами сепаратора разом із сепарувальними секціями-важелями. Нехай, рухома рама сепаратора перебуває в положенні статичної рівноваги (швидкість центра ваги частини конструкції сепаратора, що розташована на пружних опорах, вздовж вертикалі  $V_E = 0$  (рис. 2, а)) на чотирьох пружних опорах з коефіцієнтом жорсткості кожної з них  $c$ . Ексцентрик з радіусом  $r$ , що обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  навколо горизонтальної осі, яка проходить через точку  $O$ , приводить за допомогою шатуна  $AB$  з довжиною  $l$  у зворотньо-поступальний рух вздовж вертикалі повзунк. Припустимо, що під час руху повзунка вгору вздовж вертикалі зі швидкістю  $V_B$  має місце його прямий центральний абсолютно непружний удар по рухомій рамі сепаратора, після якого рухома рама разом із повзунком рухається вгору. Після

досягнення повзунком крайнього верхнього положення (КВП), в момент перебування у якому швидкість повзунка та рухомої рами вздовж вертикалі рівна  $V_B = V_E = 0$  (рис. 2, б), повзунок починає рухатися вниз, а рухома рама сепаратора разом із секціями-важелями починає коливатися на пружних опорах (рис. 2, в). Коливання тривають допоки знову не відбудеться контакт (удар) повзунка з рухомою рамою (рис. 2, г), після чого цикл повторюється.



**Рис. 2** – Розрахункові схеми зернового сепаратора ножиного типу:  
 а – рухома рама перебуває у стані статичної рівноваги;  
 б – рухома рама піднята повзунком у КВП;  
 в – рухома рама здійснює коливання, коли повзунок рухається вниз;  
 г – рухома рама рухається разом із повзунком у КВП



Замінімо рухому раму з секціями-важелями, що розташована на пружних опорах, розрахунковою моделлю (рис. 3, а). Припустимо, що кількість зернової маси (зерна різних фракцій, зернових та незернових домішок) у бункері та на робочих поверхнях секцій-важелів постійна. Знехтуємо впливом переміщення зернової маси робочими поверхнями секцій-важелів на коливальний рух рухомої рами з конструктивними елементами сепаратора, що розташовані на ній. Вважатимемо, що центр ваги частини конструкції сепаратора, яка розташована на пружних опорах, знаходиться у точці  $E$  розрахункової моделі, що знаходиться (у площині рис. 3, а) на вертикальній осі, яка проходить через точку  $O$ .

Оскільки пружні опори мають паралельне розташування, то у моделі чотири пружні опори замінені пружиною з еквівалентним коефіцієнтом жорсткості:

$$c_{np.} = 4c, \quad (1)$$

де  $c_{np.}$  – еквівалентний коефіцієнт жорсткості чотирьох пружних опор рухомої рами сепаратора, Н/м;  $c$  – коефіцієнт жорсткості пружної опори рухомої рами сепаратор, Н/м.

Нехай, повзунком, коли досягає КВП, піднімає рухому раму відносно положення статичної рівноваги на висоту  $h$ , причому виконується умова (рис. 2, б):

$$h < \Delta_{cm.}, \quad (2)$$

де  $h$  – висота максимального піднімання повзунком рухомої рами відносно положення статичної рівноваги, м;  $\Delta_{cm.}$  – деформація пружних опор сепаратора під вагою рухомої рами з секціями-важелями та зерновою масою у положенні статичної рівноваги, м.

Деформація пружних опор сепаратора у положенні статичної рівноваги  $\Delta_{cm.}$  визначається за залежністю:

$$\Delta_{cm.} = \frac{m_{cen.}g}{4c} = \frac{m_{cen.}g}{c_{np.}}, \quad (3)$$

де  $m_{cen.}$  – маса рухомої рами з розташованими на ній конструктивними елементами сепаратора та зерновою масою, що перебуває у бункері та на робочих поверхнях секцій-важелів, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Нехтуючи силами опору середовища, диференціальне рівняння руху центра ваги  $E$  частини конструкції сепаратора, що розташована на пружних опорах, вздовж вертикалі (на рис. 3, а – це вісь  $x$ ) матиме вигляд:

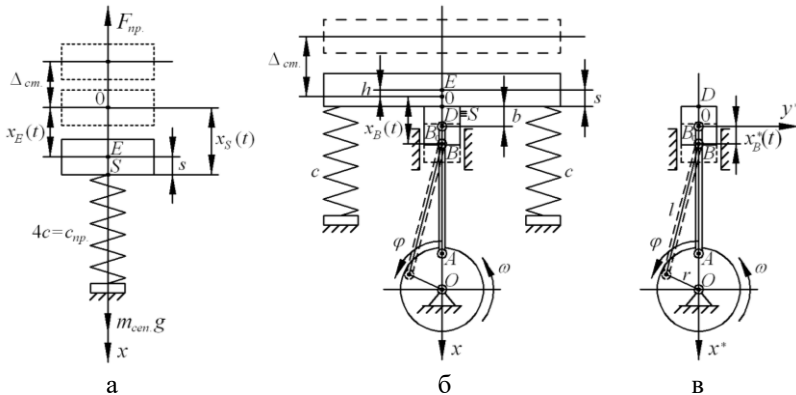
$$m_{cen.}\ddot{x}_E = m_{cen.}g - F_{np.}, \quad (4)$$

де  $\ddot{x}_E$  – прискорення центра ваги  $E$  частини конструкції сепаратора, що розташована на пружних опорах,  $\text{м/с}^2$ ;  $F_{np.}$  – сила пружності пружини (моделі),  $\text{Н}$ .

Сила пружності пружини визначається за виразом:

$$F_{np.} = c_{np.} (\Delta_{cm.} + x_E), \quad (5)$$

де  $x_E$  – переміщення центра ваги  $E$  частини конструкції сепаратора, що розташована на пружних опорах, вздовж осі  $x$ ,  $\text{м}$ .



**Рис. 3** – Розрахункові моделі:

- а – рухомої рами з секціями-важелями на пружних опорах;
- б – рухомої рами з повзунком;
- в – повзунка з ексцентриком

Ураховуючи формулу (5), а також те, що згідно виразу (3) маємо  $m_{cen.}g = c_{np.}\Delta_{cm.}$ , тоді рівняння (4) після перетворень матиме вигляд:

$$\ddot{x}_E + \frac{c_{np.}}{m_{cen.}} x_E = 0. \quad (6)$$

Позначимо  $(c_{np.}/m_{cen.})$  через  $k^2$ , тоді матимемо:

$$\ddot{x}_E + k^2 x_E = 0. \quad (7)$$

Сформуємо початкові умови для розв'язування рівняння (7):  $t_0 = 0$ ;  $x_E(0) = -h$ ;  $\dot{x}_E(0) = 0$  (у початковий момент швидкість  $\dot{x}_E$  переміщення центра ваги  $E$  рівна нулю, оскільки в цей момент рухома рама перебуває разом із повзунком у КВП і, відповідно, швидкість повзунка вздовж вертикалі (осі  $x$ ) у цьому положенні рівна нулю).

Відповідно до теорії диференціальних рівнянь [39, 40], розв'язок рівняння (7) матиме вигляд:

$$x_E(t) = c_1 \cos(kt) + c_2 \sin(kt), \quad (8)$$

де  $c_1, c_2$  – сталі інтегрування.

Визначимо сталу  $c_1$  із рівняння (8) із урахуванням початкових умов:

$$c_1 = -h. \quad (9)$$

Після диференціювання рівняння (8), матимемо:

$$\dot{x}_E(t) = -c_1 k \sin(kt) + c_2 k \cos(kt). \quad (10)$$

Визначимо сталу  $c_2$  із рівняння (10) із урахуванням початкових умов:

$$c_2 = 0. \quad (11)$$

Таким чином, із урахуванням сталих інтегрування, рівняння (8) та (10) матимуть вигляд:

$$x_E(t) = -h \cos(kt), \quad (12)$$

$$\dot{x}_E(t) = hk \sin(kt). \quad (13)$$

Ураховуючи рівняння (12), переміщення точки  $S$  рухомої рами вздовж осі  $x$  визначається за рівнянням (рис. 3, а):

$$x_S(t) = s - h \cos(kt), \quad (14)$$

де  $x_S$  – переміщення точки  $S$  вздовж осі  $x$ , м;  $s$  – довжина відрізка  $ES$ , м.

Визначимо координати початкового положення повзунка вздовж осі  $x$ , тобто у КВП, що характеризується точкою  $B_0$  (рис. 3, б):

$$x_{B_0} = s + b - h, \quad (15)$$

де  $x_{B_0}$  – координати точки  $B_0$  на осі  $x$ , м;  $b$  – довжина відрізка  $DB_0$ , м.

Приймаємо, що кут  $\varphi$  повороту ексцентрика відраховується від вертикальної осі  $x$  за годинниковою стрілкою, починаючи з КВП. Рівняння руху повзунка (на рис. 3, в – це точка  $B$ ) вздовж вертикальної осі  $x^*$  згідно [41, 42] матиме вигляд:

$$x_B^*(t) = r \left[ 1 - \cos(\omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2\omega t)) \right], \quad (16)$$

де  $x_B^*$  – переміщення повзунка вздовж вертикальної осі  $x^*$ , м;  $\lambda$  – позначення відношення  $r/l$ .

Ураховуючи рівняння (16), переміщення повзунка (точки  $B$ ) вздовж осі  $x$  матиме вигляд:

$$x_B(t) = x_{B_0} + x_B^*(t), \quad (17)$$

де  $x_B$  – переміщення точки  $B$  повзунка вздовж осі  $x$ , м.

Переміщення точки  $D$  повзунка вздовж осі  $x$  описується рівнянням:

$$x_D(t) = x_B(t) - b, \quad (18)$$

де  $x_D$  – переміщення точки  $D$  повзунка вздовж осі  $x$ , м.

Після підстановки у рівняння (18) виразів (17), (16) та (15), отримаємо:

$$x_D(t) = s - h + r \left[ 1 - \cos(\omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2\omega t)) \right]. \quad (19)$$

Після досягнення повзунком разом із рухомою рамою КВП, повзунок починає рухатися вниз вздовж осі  $x$ , а рухома рама починає коливальний рух на пружних опорах. Складемо систему рівнянь для визначення часу  $t_k$  та місця (координата по осі  $x_k$ ) наступного контакту (удару) повзунка з рухомою рамою, після якого вони знову починають рухатися разом у КВП і цикл повторюється. Із урахуванням рівнянь, що описують переміщення вздовж осі  $x$  точки  $S$  рухомої рами та точки  $D$  повзунка, складемо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} x_k &= s - h \cos(kt_k); \\ x_k &= s - h + r \left[ 1 - \cos(\omega t_k) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2\omega t_k)) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Шляхом диференціювання рівнянь (14) та (19), отримаємо залежності для визначення швидкості, відповідно, точки  $S$  рухомої рами та точки  $D$  повзунка:

$$V_S(t) = hk \sin(kt), \quad (21)$$

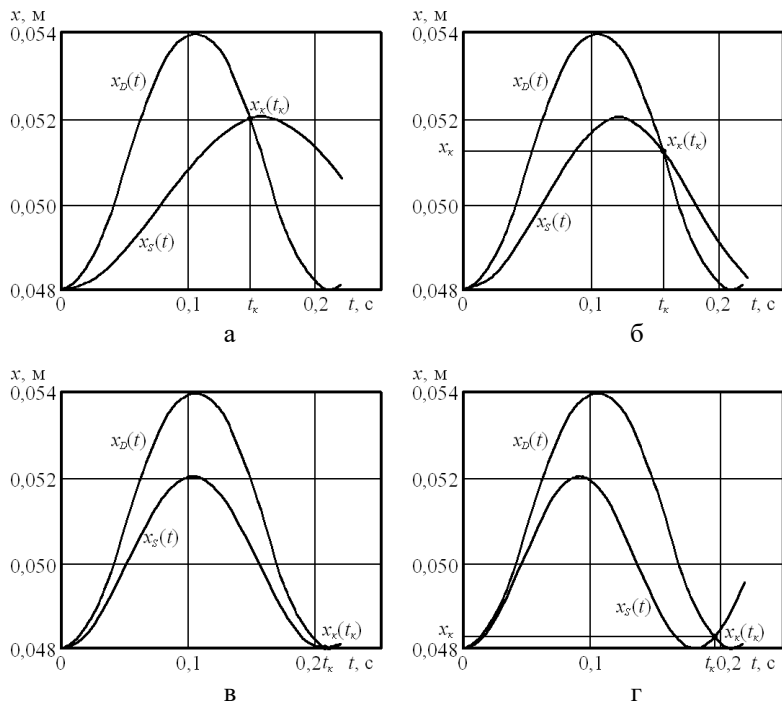
$$V_D(t) = r\omega \left[ \sin(\omega t) + \frac{\lambda}{2} \sin(2\omega t) \right], \quad (22)$$

де  $V_S$  – швидкість переміщення точки  $S$  рухомої рами вздовж осі  $x$ , м/с;  $V_D$  – швидкість переміщення точки  $D$  повзунка вздовж осі  $x$ , м/с.

Аналітичне розв'язування системи рівнянь (20) ускладнене, тому використаємо для цього систему комп'ютерної математики MathCAD14. Графічна інтерпретація розв'язків представлена на рис. 4. Проведені розрахунки показують, що у випадку пружних опор з коефіцієнтом жорсткості  $c = 6000$  Н/м контакт рухомої рами з повзунком відбудеться через  $t_k = 0,147$  с після початку рух повзунка з КВП вниз (рис. 4, а). При цьому ексцентрик сепаратора обернеться на кут ( $\varphi_k = \omega t_k$ ), що рівний  $\varphi_k = 4,41$  рад. (253 град.) Контакт (удар) між повзунком та рухомою рамою відбудеться у місці, що має координату  $x_k = 0,052$  м. При цьому швидкість повзунка буде  $V_D(t_k) = -0,084$  м/с, а швидкість рухомої рами –  $V_S(t_k) = 8 \cdot 10^{-3}$  м/с. Різні знаки швидкості вказують на те, що повзунок та рухома рама рухаються назустріч до моменту контакту, що також очевидно з графіка (рис. 4, а). Необхідно зазначити, що за цей час рухома рама не зробить повного коливання.

У випадку пружних опор з коефіцієнтом жорсткості  $c = 10000$  Н/м контакт рухомої рами з повзунком відбудеться через  $t_k = 0,154$  с, тобто

при куті повороту ексцентрика  $\varphi_k = 4,62$  рад. (265 град.) (рис. 4, б). Координата місця контакту –  $x_k = 0,051$  м. До місця контакту повзунок та рухома рама будуть рухатися в одному напрямку, оскільки їх швидкості з однаковим знаком ( $V_D(t_k) = -0,089$  м/с,  $V_S(t_k) = -0,038$  м/с), що також очевидно з графіка (рис. 4, б). У цьому випадку рухома рама також не зробить повного коливання.



**Рис. 4** – Графічні залежності  $x_D(t)$  та  $x_S(t)$  (при  $r = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $l = 0,05$  м;  $h = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $m = 60$  кг;  $s = 0,05$  м;  $\omega = 30$  рад/с):

а –  $c = 6000$  Н/м;  $x_k = 0,052$  м;  $t_k = 0,147$  с;  $\varphi_k = 4,41$  рад. (253 град.);

$V_S(t_k) = 8 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $V_D(t_k) = -0,084$  м/с;

б –  $c = 10000$  Н/м;  $x_k = 0,051$  м;  $t_k = 0,154$  с;  $\varphi_k = 4,62$  рад. (265 град.);

$V_S(t_k) = -0,038$  м/с;  $V_D(t_k) = -0,089$  м/с;

в –  $c = 14000$  Н/м;  $x_k = 0,048$  м;  $t_k = 0,208$  с;  $\varphi_k = 6,24$  рад. (358 град.);

$V_S(t_k) = 4,3 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $V_D(t_k) = -4,1 \cdot 10^{-3}$  м/с;

г –  $c = 18000$  Н/м;  $x_k = 0,048$  м;  $t_k = 0,196$  с;  $\varphi_k = 5,88$  рад. (337 град.);

$V_S(t_k) = 0,034$  м/с;  $V_D(t_k) = -0,037$  м/с

У випадку пружних опор з коефіцієнтом жорсткості  $c = 14000$  Н/м контакт між рухомою рамою та повзунком сепаратора матиме місце через  $t_k = 0,208$  с, тобто при куті повороту ексцентрика  $\varphi_k = 6,24$  рад. (358 град.) (рис. 4, в). Координата місця контакту –  $x_k = 0,048$  м. До місця контакту повзунок та рухома рама будуть рухатися в протилежних напрямках, оскільки їх швидкості мають різні знаки ( $V_D(t_k) = -4,1 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $V_S(t_k) = 4,3 \cdot 10^{-3}$  м/с). Із графіка (рис. 4, в) очевидно, що у цьому випадку рама зробить одне повне коливання.

Одне повне коливання рухома рама зробить і у випадку з коефіцієнтом жорсткості пружних опор  $c = 18000$  Н/м. Контакт рухомої рами та повзунка матиме місце через  $t_k = 0,196$  с, тобто при куті повороту ексцентрика  $\varphi_k = 5,88$  рад. (337 град.) (рис. 4, г). Координати місця контакту –  $x_k = 0,048$  м. До місця контакту повзунок та рухома рама будуть рухатися в протилежних напрямках, оскільки їх швидкості мають різні знаки ( $V_D(t_k) = -0,037$  м/с,  $V_S(t_k) = 0,034$  м/с).

Необхідно зазначити, що на графіках (рис. 4) також показане уявне переміщення (для випадку, коли жодного впливу на рухома раму зі сторони повзунка не відбулося) точки  $S$  рухомої рами після її контакту з повзунком у точці з координатою  $x_k$ . Насправді ж після контакту з повзунком рухома рама буде рухатися разом із ним до КВП, тобто координати точок  $S$  та  $D$  будуть співпадати.

### Висновки

Проведені теоретичні дослідження дозволили змоделювати рух конструктивних елементів зернового сепаратора ножичного типу. Так, встановлені закони руху повзунка та рухомої рами із сепарувальними секціями-важелями. Отримані залежності дозволяють розрахувати та обрати раціональні параметри і режими роботи механізму приводу сепаратора. Обґрунтовуючи параметри сепаратора за результатами моделювання, зокрема значення коефіцієнта жорсткості пружних опор та кутової швидкості обертання ексцентрика, необхідно керуватися тим, щоб було забезпечено хоча б одне повне коливання рухомої рами між її контактами з повзунком, що створить сприятливі умови для сепарування зернової маси та очищення решіт. Доцільно, щоб контакт між рухомою рамою та повзунком відбувся, коли вони рухатимуться в одному напрямку або ж у протилежних напрямках, але з невеликими швидкостями. Із розглянутих випадків очевидно, що за коефіцієнта жорсткості пружних опор  $c = 14000$  Н/м матиме місце повне коливання рухомої рами між контактами з повзунком. Хоча, у цьому випадку до місця контакту рухома рама з сепарувальними секціями та повзунок рухаються у протилежних напрямках, але їх швидкості є невеликими ( $V_S(t_k) = 4,3 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $V_D(t_k) = -4,1 \cdot 10^{-3}$  м/с), відповідно, ударна сила

буде меншої, що сприятиме тривалій експлуатації приводу сепаратора ножичного типу.

### Список посилань

1. Верещинський, О. (2018). Правильний підхід до очищення зерна. Пропозиція, 11.
2. Верещинський, О. (2019). “Вузькі місця” післязбирального очищення зерна. Пропозиція, 2.
3. Мерко, І.Т., Моргун, В.О. (2001). Наукові основи і технологія переробки зерна: підручник для студ. вищих навч. закладів. Друк, Одеса, 348.
4. Камінський, В.Д., Бабич, М.Б. (2000). Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції: навчальний посібник для вузів. Аспект, Одеса, 460.
5. Шпак, В.М. (2021). Удосконалення технології приймально-відпускних операцій та зберігання зерна на зернових терміналах [Дисертація канд. техн. наук]. Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 224.
6. Богомолов, А.В. (2006). Научное обоснование энергосберегающих процессов и оборудования для сепарации пищевого сыпучего сырья [Дисертація д-ра техн. наук]. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, Харків, 412.
7. Kugbei, S., Avungana, M., Hugo, W. (2018). Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and AfricaSeeds. Rome.
8. Giyevskiy, A.M., Orobinsky, V.I., Tarasenko, A.P., Chernyshov, A.V., Kurilov, D.O. (2018). Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 327 (2018) 042035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
9. Карташевич, С.М. (2001). Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян: монографія. РУП “БелНИИАгроэнерго”, Минск, 288.
10. Дударев, І.М. (2017). Розрахунок машин зі спіральними робочими поверхнями: монографія. Інформ.-вид. відділ Луцького НТУ, Луцьк, 228.
11. Дударев, І.М. (2019). Вібраційно-каскадний сепаратор. Патент №138942, Україна.
12. Дударев, І.М. (2020). Сепаратор гравітаційно-каскадного типу. Патент №139435, Україна.
13. Дударев, І.М. (2020). Каскадний сепаратор. Патент №139608, Україна.
14. Дударев, І.М., Ольховський, В.О. (2021). Сепаратор ножичного типу. Патент №146814, Україна.
15. Wang, Y., Yu, J., Yu, Y., Fu, H. (2017). Numerical simulation of the particular flow on an agricultural screen with a complex motion based on the coupling model of PMBK with DEM. In: X. Li, Y. Feng, G. Mustoe (eds): Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods. DEM 2016.

- Springer Proceedings in Physics. Springer, Singapore, 188, 687–695. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5\\_71](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_71)
16. Bracacescu, C., Gageanu, I., Popescu, S., Selvi, K.C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development, Jelgava*, 364–370.
  17. Elskamp, F., Kruggel-Emden, H. (2015). Review and benchmarking of process models for batch screening based on discrete element simulations. *Advanced Powder Technology*, 26(3), 679–697. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.11.001>
  18. Voicu, G., Casandroi, T., Tarcolea, C. (2008). Testing stochastic models for simulating the seeds separation process on the sieves of a cleaning system, and a comparison with experimental data. *Agricultural Conspectus Scientificus*, 73(2), 95–101.
  19. Chen, Y., Tong, X. (2009). Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 493–497. [https://doi.org/10.1016/s1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/s1674-5264(09)60092-2)
  20. Badretdinov, I., Mudarisov, S., Lukmanov, R., Ibragimov, R., Permyakov, V., Tuktarov, M. (2020). Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 60(1), 19–28. <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-02>
  21. Mircea, C., Nenciu, F., Vladut, V., Voicu, G., Gageanu, I., Cujbescu, D. (2020). Increasing the performance of cylindrical separators for cereal cleaning, by using an inner helical coil. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3), 249–258. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-26>
  22. Dong, K.J., Wang, B., Yu, A.B. (2013). Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: from discrete particle simulation to process performance prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(33), 11333–11343. <https://doi.org/10.1021/ie3034637>
  23. Mao, H., Wang, Q., Li, Q. (2020). Modelling and simulation of the straw-grain separation process based on a discrete element model with flexible hollow cylindrical bonds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105229. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105229>
  24. Panasiewicz, M., Sobczak, P., Mazur, J., Zawislak, K., Andrejko, D. (2012). The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials. *Journal of Food Engineering*, 109(3), 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010>
  25. Meng, X., Jia, F., Qiu, H., Han, Y., Zeng, Y., Xiao, Y., Chen, P. (2019). DEM study of white rice separation in an indented cylinder separator. *Powder Technology*, 348, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.013>
  26. Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M. (2002). A numerical simulation of separation of crop seeds by screening – effect of particle bed depth. *Food and Bioproducts Processing*, 80(2), 109–117. <https://doi.org/10.1205/09603080252938744>
  27. Harzanagh, A.A., Orhan, E.C., Ergun, S.L. (2018). Discrete element modelling of vibrating screens. *Minerals Engineering*, 121, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.010>



28. Sharapov, R.R., Prokopenko, V.S., Sharapov, R.R. (2013). Modeling of the separation process in dynamic separators. *World Applied Sciences Journal*, 25(3), 536–542.
29. Lenaerts, B., Aertsen, T., Tijssens, E., De Ketelaere, B., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Saeyns, W. (2014). Simulation of grain-straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 101, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.12.002>
30. Wang, G., Tong, X. (2011). Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology*, 21(3), 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>
31. Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., Dong, H. (2011). Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM. *Mining Science and Technology*, 21(5), 677–680. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.03.010>
32. Заика, П.М., Мазнев, Г.Е. (1978). Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. Колос, Москва, 287.
33. Блехман, И.И., Джанелидзе, Г.Ю. (1964). Вибрационное перемещение. Наука, Москва, 412.
34. Гольдин, А.В., Чирков, Н.Н. (1974). Оптимизация процесса вибрационной сепарации сыпучих материалов. Производственно-технический бюллетень, 6, 12–17.
35. Заика, П.М. (1977). Динамика вибрационных зерноочистительных машин. Машиностроение, Москва, 278.
36. Плисс, Д.А. (1967). К теории вибрационной сепарации. *Механика твердого тела*, 4, 25–31.
37. Сергеев, А.П., Макаров, А.В., Журавлев, А.В. (2015). К вопросу о бесситной сепарации сыпучих многокомпонентных материалов. *Фундаментальные исследования*, 2(22), 4871–4875.
38. Галкин, В.Д., Хандриков, В.А., Хавыев, А.А. (2017). Сепарация семян в вибропневмооживленном слое: технология, техника, использование: монография. ИПЦ “ПрокростЪ”, Пермь, 170.
39. Павловський, М.А. (2002). Теоретична механіка: підручник. Техніка, Київ, 512.
40. Бондаренко, А.А., Дубінін, О.О., Переяславцев, О.М. (2004). Теоретична механіка: підручник: у 2 ч. – ч. 2: Динаміка. Знання, Київ, 590.
41. Гутров, М.А. (2010). Уравнение движения кривошипно-ползунного привода режущего аппарата жаток с учетом кинематики шатуна. *Достижение науки и техники АПК*, 2, 66–69.
42. Гоц, А.Н. (2005). Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие. Владимирский гос. ун-т., Владимир, 124.

## INNOVATION TECHNOLOGY OF VEGETABLE AND FRUIT PROCESSING FOR CRAFT AGRICULTURAL PRODUCTION

S. Panasyuk\*, I. Taraymovich

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine



### Key words:

three-layer fruit and vegetable chips, enrichment with dietary fiber, flax raw materials, fruit and vegetable drying, flaxseed

### Article history:

Received 04.02.2021

Accepted 05.05.2021

### \*Corresponding author:

panasyuk\_s@ukr.net

### ABSTRACT

*The use of natural biologically active ingredients in food production helps to provide the human body with energy material and increase its protection from the adverse effects of the environment. Craft productions for processing vegetable raw materials and creation of new health-improving and functional products on their basis are developing in Ukraine. One of the innovative food products is fruit and vegetable chips, which have high taste and dietary properties. Known technologies for the production of fruit and vegetable chips, which include technological operations of inspection, washing, cleaning of fruits and vegetables, cutting them into plates, parothermal processing, drying, cooling and packaging. Based on the analysis of existing technologies for the production of fruit and vegetable chips, a technology is proposed that allows us to obtain an innovative product, namely three-layer fruit and vegetable chips enriched with dietary fiber. Fruit and vegetable chips contain flaxseed, which is both a source of protein and essential and non-essential amino acids. Polyunsaturated fatty acids Omega-3, Omega-6, Omega-9, which are part of flax seeds, help regulate biochemical processes in the human body. The article describes the process of forming three-layer fruit and vegetable chips from domestic raw materials, regimes of the drying process of the formed semi-finished products and the technological scheme of production. It is important for farmers who grow organic fruits and vegetables to have stable markets, as vegetables and fruits are seasonal products and if they are not sold immediately, storage costs are required. This problem can be solved by the organization of craft productions for processing fruits and vegetables into multilayer chips.*

УДК 664.8.047

**ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ОВОЧІВ  
ТА ФРУКТІВ ДЛЯ КРАФТОВИХ АГРОВИРОБНИЦТВ****С.Г. Панасюк\*, І.В. Тараймович**

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

**Ключові слова:**

тришарові овочево-фруктові чипси, збагачення харчовими волокнами, лляна сировина, сушіння овочів та фруктів, лляне насіння

**Історія публікації:**

Отримано 04.02.2021

Затверджено 05.05.2021

**\* Автор для****листування:**

panasyuk\_s@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

Використання природних біологічно активних інгредієнтів у виробництві харчових продуктів дозволяє забезпечити організм людини енергетичним матеріалом та підвищити його опірність несприятливому впливу навколишнього середовища. В Україні розвиваються крафтові виробництва із перероблення рослинної сировини та створення на її основі нових оздоровчих та функціональних продуктів. Одним із інноваційних харчових продуктів є фруктово-овочеві чипси, які мають високі смакові якості та дієтичні властивості. Відомі технології виробництва овочево-фруктових чипсів, які передбачають технологічні операції інспектування, миття, очищення овочів та фруктів, нарізування їх на пластинки, паротермічне оброблювання, сушіння, охолодження та фасування. На основі аналізу відомих технологій виробництва овочево-фруктових чипсів запропоновано технологію, яка дозволяє отримати інноваційний продукт, а саме багатошарові овочево-фруктові чипси, збагачені харчовими волокнами. До складу овочево-фруктових чипсів вводиться лляне насіння, яке є як джерелом білку, так і заміних і незамінних амінокислот. Поліненасичені жирні кислоти Омега-3, Омега-6, Омега-9, що входять до складу насіння льону, сприяють регулюванню біохімічних процесів в організмі людини. У статті подано опис технологічного процесу виробництва багатошарових овочево-фруктових чипсів із міццевої органічної сировини та його режимми. Запропонована технологія дозволить ефективно переробляти урожай органічних фруктів та овочів агровиробникам.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.495>

### Стан питання та постановка проблеми

Формування здорового раціону харчування на основі концепції збалансованості харчових речовин диктує необхідність створення продуктів із підвищеною харчовою цінністю. Овочі та фрукти містять органічні кислоти, пектинові речовини, вітаміни, мінерали, а їх вживання є корисним для організму людини. Сезонність вирощування овочів та фруктів спонукає шукати шляхи їх зберігання та перероблення з отриманням продуктів, що характеризуються високою харчовою цінністю. Одним із напрямів підвищення харчової цінності продуктів є використання в технологіях й рецептурах добавок біологічно цінної рослинної сировини.

Ефективним джерелом біологічно активних інгредієнтів визнано рослинну сировину, оскільки її складові знаходяться у формі природних сполук, що добре засвоюються організмом [1]. Насіння льону (*Linum usitatissimum* L.) розглядається сучасною дієтологією не лише як джерело харчової олії, що багата  $\alpha$ -ліноленою кислотою, але й в якості додаткового джерела харчового білку, розчинних і нерозчинних харчових волокон та лігнанів. Саме із властивостями перерахованих компонентів лляного насіння та продуктів його перероблення потрібно пов'язувати зростаючу популярність включення насіння льону до складу харчових продуктів. Встановлено, що розчинні харчові волокна сприяють зниженню рівня глюкози та холестерину, у том числі при включенні до раціону хворих цукровим діабетом [2]. Також харчова цінність лляного насіння полягає в можливості його використання як джерела білку, при цьому важливе значення має його повноцінність, кількісний і якісний склад замісних і незамінних амінокислот. Необхідно зазначити, що амінокислотний склад лляного насіння задовольняє сучасні вимоги і дієтичні рекомендації. Білки насіння льону за біологічною повноцінністю аналогічні білкам сої, які визнані найбільш цінним рослинним білком. Вміст незамінних амінокислот у білку льону становить понад 75% від суми амінокислот білка. Правильний баланс Омега-3, Омега-6 та Омега-9 поліненасичених жирних кислот (ПНЖК), що входять до складу насіння льону, необхідний абсолютно для всіх процесів життєдіяльності організму людини.

Нині великої популярності серед різних верств населення набуває здорове харчування, тому на ринку все частіше з'являється органічна овочева та фруктова продукція, що виготовляється із вітчизняної та імпортованої сировини. Перспективним способом перероблення цієї сировини є отримання овочевих та фруктових чипсів із додаванням лляної сировини, які мають високі смакові якості, дієтичні властивості,

малокалорійні та не втрачають вітамінів, що містяться у початковій сировині.

Крафтові виробники в Україні пропонують широкий асортимент овочевих та фруктових чипсів, які можуть бути самостійною стравою в харчуванні людини. Тому актуальним завданням є створення продуктів харчування, які мають профілактичні й лікувальні властивості, містять харчові волокна, що впливають на процеси травлення й всмоктування поживних речовин в організмі людини, що, в свою чергу, призводить до швидшого відчуття насичення та сприяє меншому споживанню енергії із їжею. Крім того, включення до складу овочево-фруктових чипсів харчових волокон льону збагачує цей продукт макро- і мікроелементами, що беруть участь в кровотворенні та є складовими частинами низки гормонів, вітамінів та ферментів.

**Мета дослідження** – розроблення технології виробництва овочево-фруктових чипсів із додаванням лляної сировини, що збагачена харчовими волокнами.

#### **Матеріали і методи**

При розробленні технології виробництва овочево-фруктових чипсів проводився аналіз наукових та науково-технічних джерел інформації. Також проводилися експериментальні дослідження із визначення раціональних режимів оброблення овочево-фруктової сировини та насіння льону.

#### **Результати дослідження та обговорення**

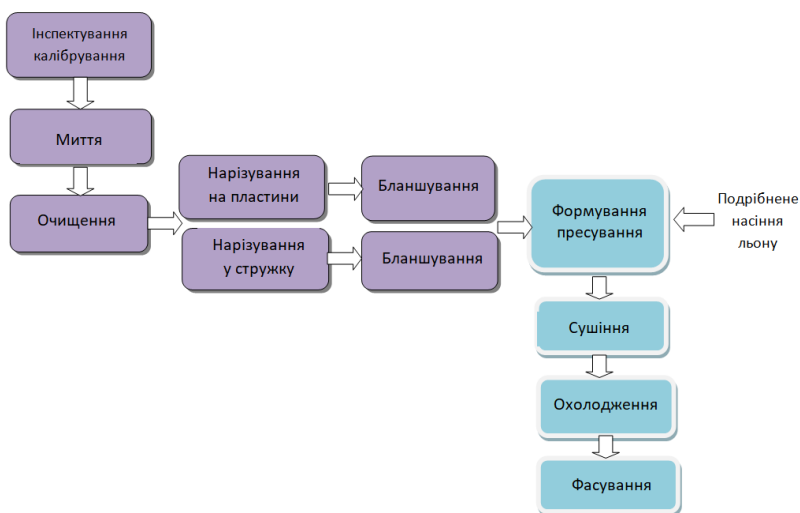
Виробництво овочево-фруктових чипсів в Україні лише набирає обертів. Велика сировинна база дозволяє забезпечити ефективну роботу крафтових підприємств з виробництва цього виду продукції. Найбільшу частку серед овочево-фруктових чипсів становлять яблучні чипси, оскільки яблука є найпоширенішими плодами в нашій країні і мають корисні властивості. Як сировину для виробництва чипсів також використовують груші, моркву, кабачки, гарбуз, буряк тощо.

Технологічний процес виробництва овочево-фруктових чипсів як правило передбачає операції підготовки овочів та фруктів, а саме: сортування, калібрування, миття, очищення (за потреби), нарізування на пластинки певної товщини, а також операції паротермічного оброблювання або витримування у цукровому сиропі, сольовому, ферментному розчині тощо. Однією з основних технологічних операцій під час виробництва чипсів є сушіння, яке найчастіше проходить у сушарках із використанням нагрітого атмосферного повітря, інфрачервоних променів, струмів високої і надвисокої частоти. Після сушіння чипси охолоджуються та запаковуються [3–9].

Відомі також технології виробництва овочевих і фруктових чипсів, які містять операцію із нанесення на поверхню готового продукту різних смакових добавок, наприклад, кориці, ванілі, що змінюють його природний смак та аромат, але не підвищують харчову цінність.

На основі аналізу відомих технологій виробництва чипсів із овочевої і фруктової сировини та із урахуванням харчової цінності лляного насіння було запропоновано інноваційну технологію виробництва багатшарових овочево-фруктових чипсів із додаванням насіння льону [9].

Для виробництва чипсів придатними є овочі та фрукти технічного ступеня стиглості зі щільним м'якушем. Тришарові чипси складаються з овочевої або фруктової основи, шару подрібненого насіння льону та шару овочів або фруктів у вигляді стружки. В якості сировини для виробництва овочево-фруктових чипсів рекомендуються органічні яблука, груші, кабачки, морква та гарбуз. Технологічна схема виробництва тришарових чипсів зображена на рис. 1.



**Рис. 1** – Технологічна схема виробництва тришарових чипсів

Технологічний процес виробництва тришарових чипсів розпочинається з інспектування овочів та фруктів, калібрування за розмірами плодів. Наступним етапом є миття, метою якого є видалення з поверхні плодів забруднень, механічних домішок, пестицидів та мікрофлори. Під час очищення овочів та фруктів

видаляють неїстівні частини плодів: плодоніжки, насінневі камери. Із коренеплодів моркви та гарбуза обов'язково видаляють шкірку.

Овочі та фрукти, які використовуються як основа тришарових чипсів, рекомендується нарізувати тонкими пластинками товщиною 1–3 мм, а плоди, з яких буде формуватися покривний шар, терти у стружку довжиною не більше 10 мм, шириною не більше 5 мм і товщиною до 1 мм. Отримані пластинки та стружку бланшують із використанням насиченої водяної пари. Тривалість бланшування залежить від виду сировини, яка переробляється, її сорту, ступеня стиглості, а також розмірів частинок плодів. Що щільнішим є м'якуш овочів та фруктів, то тривалішим є паротермічне оброблення. Наприклад, тривалість бланшування пластинок кабачків становить близько 120 с, а для пластинок яблук та груш тривалість бланшування перебуває в межах 30–60 с. Терті у стружку яблука та груші не рекомендується бланшувати, щоб уникнути надмірного виділення клітинного соку. Паротермічне оброблення пластинок овочів та фруктів, що становлять основу чипсів, також підвищує міцність адгезійного з'єднання шарів при формуванні багатшарових чипсів.

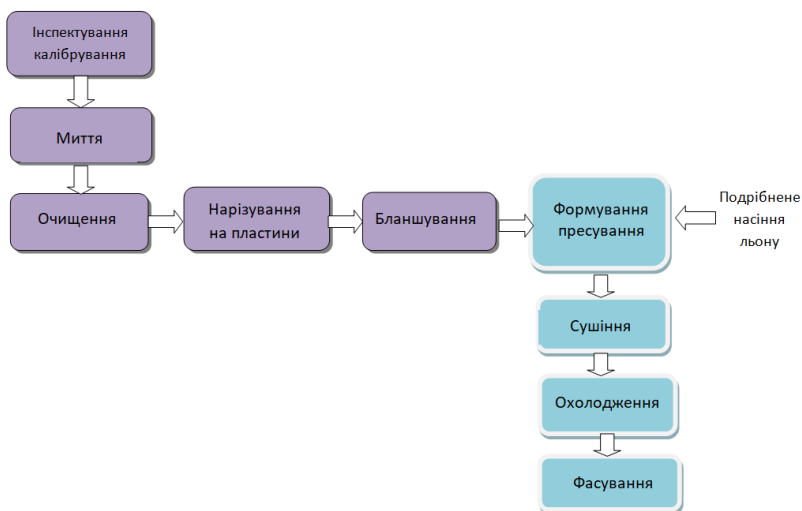
Для збагачення чипсів харчовими волокнами пропонується один із шарів формувати із насіння льону-довгунця або льону олійного. Підготовлення насіння полягає в його очищенні від домішок та подрібненні до величини фракцій, що не перевищує 2 мм.

Під час формування чипсів бланшовані пластинки овочів та фруктів з одного боку паніруються у подрібненому насінні льону, внаслідок чого утворюється другий шар чипсів, на якому, у свою чергу, формується шар із стружки плодів. Сформовані тришарові напівфабрикати пресуються для забезпечення міцності з'єднання шарів. Рекомендований тиск пресування становить 2–5,5 кПа.

В аналогічний спосіб можна формувати двошарові чипси, відповідно до якого нарізані пластинки овочів чи фруктів, які пройшли паротермічне оброблення (бланшування), панірують у подрібненому насінні льону та спресовують. Технологічна схема виробництва двошарових чипсів зображена на рис. 2.

Основним етапом технологічного процесу виробництва овочево-фруктових чипсів є сушіння сформованих напівфабрикатів. Відомі різні способи сушіння овочів та фруктів, але найчастіше під час виробництва чипсів використовується конвективне сушіння. При цьому, температура сушильного агента не має перевищувати +80°C. Це пов'язано із тим, що за вищих температур біохімічні процеси будуть проходити дуже інтенсивно і разом із парами води будуть виводитися із сировини леткі речовини (альдегіди, спирти, складні

ефіри та інші речовини), які забезпечують аромат та смак готового продукту.



**Рис. 2** – Технологічна схема виробництва двошарових чипсів

Рекомендується сушіння сформованих напівфабрикатів проводити за температури сушильного агента  $+ (63-70)^{\circ}\text{C}$  до кінцевої вологості чипсів 6–8%, за якої забезпечується хрусткість готового продукту.

Необхідно зазначити, що сушіння є тривалим та енергоємним процесом, який потребує великих затрат теплової енергії. Тому використовуючи попереднє паротермічне оброблення сировини можна інтенсифікувати процес сушіння і, відповідно, зменшити його тривалість. Для зниження температури готових виробів перед фасуванням чипси охолоджують до температури  $+ (15-20)^{\circ}\text{C}$ . Фасувати готовий продукт потрібно у герметичну тару, щоб уникнути його зволоження та погіршення смаку.

### Висновки

Запропонована інноваційна технологія виробництва багатошарових овочево-фруктових чипсів із додаванням насіння льону, яка дозволяє отримати харчовий продукт із органічної сировини місцевого походження, який збагачений харчовими волокнами та має високі смакові властивості. Запропонована технологія може бути впроваджена на агропідприємствах, які займаються вирощуванням овочів та фруктів, що дозволить переробляти весь урожай без втрат.



**Список посилань**

1. Пашенко, Л.П., Прохорова, А.С., Кобцева, Я.Ю., Никитин, И.А. (2004). Характеристика семян льна и их применение в производстве продуктов питания. Хранение и переработка сельхозсырья, 7, 56–57.
2. Kristensen, M., Jensen, M.G., Aarestrup, J. et al. (2012). Flaxseed dietary fibers lower cholesterol and increase fecal fat excretion, but magnitude of effect depends on food type. *Nutrition & Metabolism*, 9(8). <https://doi.org/10.1186/1743-7075-9-8>.
3. Снежкін, Ю.Ф., Шапар, Р.О., Гусарова, О.В. (2015). Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів. *Промышленная теплотехника*, 37, 29–37.
4. Шапар, Р.О., Гусарова, О.В. (2014). Інноваційна технологія виробництва овочево-фруктових чипсів. *Наукові праці ОНАХТ*, 45, 182–185.
5. Шапар, Р.О., Гусарова, О.В. (2017). Аналіз інноваційних технологій для виробництва фруктових чипсів. *Промышленная теплотехника*, 39, 53–58.
6. Яворська, О.Ф. (2008). Спосіб виробництва сухих фруктових або овочевих чипсів. Патент №34365, Україна.
7. Снежкін, Ю.Ф., Шапар, Р.О., Гусарова, О.В. (2012). Спосіб виробництва яблучних чипсів. Патент №73160, Україна.
8. Снежкін, Ю.Ф., Шапар, Р.О. (2014). Спосіб виробництва гарбузових чипсів. Патент №110000, Україна.
9. Дударев, І.М., Панасюк, С.Г., Тараймович, І.В., Бойко, А.А., Шишка, О.Б. (2021). Спосіб виробництва багатошарових чипсів. Патент №146536, Україна.

## MODELING OF AERODYNAMICALLY RATIONAL SPRAYING DEVICE

A. Pastushenko\*

Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine



### **Key words:**

spraying plants,  
sprayer,  
two-phase medium,  
boundary layer,  
flow channel

### **Article history:**

Received 10.04.2021

Accepted 10.05.2021

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

pastushenkoandrey1987  
@gmail.com

### **ABSTRACT**

*The chemical method of plant protection is very common, as its advantages are biological and economic efficiency and a wide range of pesticides. Sprayers of various designs are used to treat plants with pesticides in agriculture. The problem of plant protection with chemicals is becoming increasingly important nowadays in agriculture. The state's agricultural production loses almost a third of the gross harvest in crop production from pests, diseases, and weeds. The existing chemical protection of crops needs to be developed and improved. This article raises the need of developing new analytical approaches to the design and implementation of spraying plants working bodies that meet modern technological requirements by improving the aerodynamic sprayer flow performance. The design of the spray can be considered perfect in aerodynamic terms if it shows the absence of boundary layer separation from the wall, or if the separation area is located as downstream as possible. To do this, the calculation determines the place of boundary layer separation from the wall based on the study of the working fluid two-phase environment and metabolic processes occurring in it, characteristics that significantly affect the formation and development of the boundary layer and its separation. This approach helps to reduce energy losses. Based on the study of existing analytical solutions that can be adapted to two-phase media in the channel of the working fluid atomizer movement model, in combination with the graph analytical method of constructing the channel surfaces. The paper established that the non-uniformity degree reduction of the velocity field in any section of the spraying device largely depends on the smooth transition from one section to another.*

УДК 533.6.013.12:626.845

**МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНО РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ**

А.С. Пастушенко\*

Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна

**АНОТАЦІЯ**

Проблема хімічного захисту рослин набуває все більшого значення, оскільки аграрне виробництво держави втрачає від шкідників, хвороб та бур'янів, за окремими культурами, майже третину валового збору урожаю. Існуючий парк засобів хімічного захисту сільськогосподарських культур, цілеспрямований на підвищення ефективності цієї роботи, потребує розвитку і вдосконалення. Тематика статті обумовлена необхідністю розроблення нових аналітичних підходів щодо проектування робочих органів обприскувачів рослин, які відповідають сучасним технологічним вимогам, шляхом покращення аеродинамічних показників проточної частини розпилювача. Конструкція розпилювача є досконалою в аеродинамічному відношенні, якщо відсутній відрив прикордонного шару від стінки або якщо область відриву розташована як можна нижче за течією. Для цього визначається місце відриву прикордонного шару від стінки на основі дослідження двофазного середовища робочої рідини та обмінних процесів, характеристик, що істотно впливають на формування та розвиток прикордонного шару і його відрив, а, отже, на мінімізацію опору обтічних поверхонь. Наслідком цього підходу є зниження втрат енергії. На основі дослідження відомих аналітичних рішень, які можна адаптувати до моделювання руху двофазних середовищ у каналі розпилювача робочої рідини, в комплексі із графоаналітичним методом конструювання поверхонь каналу, запропоновано підхід, що дозволяє профілювати робочі органи обприскувачів зі зменшеними втратами енергії.

**Ключові слова:**

обприскування рослин,  
розпилювач,  
двофазне середовище,  
прикордонний шар,  
проточний канал

**Історія публікації:**

Отримано 10.04.2021

Затверджено 10.05.2021

**\* Автор для****листування:**

pastushenkoandrey1987  
@gmail.com

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.485>

### Стан питання та постановка проблеми

Зміна клімату, виснаження ґрунтів, необдумане застосування пестицидів і добрив піддають ризику стійкість продовольчих і сільськогосподарських систем. Зокрема, надмірне застосування пестицидів призводить до знищення природних екосистем, що, в свою чергу, призводить до подальших спалахів хвороб. Це може підірвати продовольчу безпеку як на національному, так і на регіональному рівні. Інтенсивне зловживання особливо небезпечними хімічними речовинами перешкоджає ходу сільськогосподарських робіт, забезпеченню повноцінного харчування та наражає на небезпеку здоров'я населення і майбутнє сільського господарства.

При цьому хімічний метод захисту рослин залишається достатньо поширеним завдяки високій біологічній і економічній ефективності, широкому асортименту пестицидів [1] для захисту будь-якої сільськогосподарської культури, універсальності та доступності у використанні, швидкій і надійній дії.

Наприклад, програмою “Зерно України” передбачено вийти на щорічний обсяг виробництва зерна в країні [2] на рівні 80 млн. т. Проте погодні умови (потепління клімату) та господарські чинники (виведення сотень тисяч гектарів землі з господарського використання, порушення сівозмін, нестача техніки й пально-мастильних матеріалів, хімічних та біологічних засобів захисту тощо) часто є причиною загострення фітосанітарного стану посівів зернових. За цих умов мають місце масові розмноження та висока шкідливість шкідників, збудників хвороб рослин та бур'янів, через що недобори урожаїв зерна можуть сягати 30% і навіть 50% [3]. Отже, захист зернових культур від шкідливих організмів є важливим резервом для одержання значної частини додаткової продукції покращеної якості.

Одним з технічних засобів застосування пестицидів є наземні обприскувачі, які поділяються на автомобільні, тракторні та самохідні. Відбувається постійне удосконалення наземних обприскувачів з підвищенням техніко-економічних показників [4] шляхом збільшення робочої швидкості, ширини захвату, застосування комп'ютерних систем керування технологічними операціями внесення пестицидів. При цьому базовим для наземних штангових обприскувачів залишається щільний розпилювач та його модифікації.

Різні типи розпилювачів мають чималі резерви у покращенні експлуатаційних показників – економічності, надійності, довговічності екологічності та безпеки обслуговування, що обумовлює необхідність проведення досліджень з проектування енергоефективних робочих органів для реалізації технологічного процесу обприскування рослин.

**Мета дослідження** – дослідити рух багатокomпонентного середовища робочої рідини хімічного захисту рослин з метою профілювання аеродинамічно раціональної проточної частини установки і, як наслідок, зменшення втрат енергії під час процесу обприскування.

### **Матеріали і методи**

Аналітичний опис процесу переміщення багатокomпонентного середовища виконано за допомогою рівнянь руху, що відображають плоску стаціонарну течію двофазного середовища за умови припущення, що обидві фази середовища нестисливі, фазові переходи, зіткнення частинок дисперсної фази і їх дроблення відсутні. Побудову проточної частини установки вирішено графоаналітичним методом конструювання поверхонь каналу.

### **Результати дослідження та обговорення**

При розпилюванні засобів захисту рослин використовується двофазне середовище, одним із головних компонентів якого є рідина. Теоретичне рішення задачі про переміщення двофазних середовищ пов'язано із тим або іншим спрощенням реальної “картини” середовища, з тим або іншим ступенем ідеалізації його властивостей. Проте система диференціальних рівнянь для опису руху двофазної рідини повинна враховувати принципову розривність середовища та обмінні процеси, які в ньому відбуваються, а саме масообмін, обмін енергією та кількістю руху.

Одна зі схем формування системи рівнянь двофазного середовища полягає в тому, що рівняння збереження маси, кількості руху і енергії, а також рівняння стану, теплообміну і кінетики фазових переходів записуються окремо для кожної фази. Структура середовища вважається відомою. Цей метод при розв'язуванні прикладних задач пов'язаний зі значними труднощами, оскільки елементи дискретної фази в реальному середовищі різноманітні за розмірами, і, як правило, випадковим чином розподілені у просторі.

Більш перспективною є схематизація, коли вихідне гетерофазне середовище розглядається як нерозривне. У цьому випадку передбачається, що кожна із фаз рівномірно розподілена у виділеному об'ємі та є суцільною.

Рівняння руху багатокomпонентних середовищ за умови відсутності фазових переходів проаналізоване Рахматуліним Х.А. [5]. Відповідно до цього методу, при змішуванні декількох компонентів для кожного з них у будь-якій точці простору, де відбувається їх взаємодія, будуть свої значення вектора швидкості, щільності і температури. Для обліку

взаємодії компонентів у процесі змішування вводиться так звана функція взаємодії  $K$ . Таким чином, метод дослідження двофазного середовища виходить з того, що рух кожного компонента описується з урахуванням взаємодії між ними.

Система рівнянь досліджуваного явища записується у такий спосіб. Зв'язок між наведеною  $\rho$  та справжньою  $\dot{\rho}$  густиною становить:

$$\frac{\rho_1}{\dot{\rho}_1} + \frac{\rho_2}{\dot{\rho}_2} = 1, \quad (1)$$

Рівняння нерозривності:

$$d(\rho_1 u_1) = 0, \quad (2)$$

$$d(\rho_2 u_2) = 0.$$

Рівняння руху із урахуванням сил тиску  $p$  і взаємодії  $K$ :

$$\rho_1 w_1 \frac{du_1}{dx} = -\frac{\rho_1}{\dot{\rho}_1} \frac{dp}{dx} + K(u_2 + u_1), \quad (3)$$

$$\rho_2 w_2 \frac{du_2}{dx} = -\frac{\rho_2}{\dot{\rho}_2} \frac{dp}{dx} + K(u_1 + u_2),$$

де  $u$  – швидкість.

Рівняння енергії необхідно скласти для кожного компонента окремо. Для вектора теплопровідності можна записати:

$$q_T = \lambda_i \frac{d^2 T_i}{dx^2}, \quad \text{де } i = 1, 2, \quad (4)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності компонента.

Тепло, передане шляхом конвективного теплообміну від одного компонента до другого, визначається за виразом:

$$q_k = \alpha \Delta T, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі.

Схожий підхід для дослідження багатокомпонентного середовища було використано Драгановим Б.Х. [6]. У науковій праці [7] представлена математична модель гетерофазного середовища, яка ґрунтується на вираженні осереднення параметрів процесу за інтервалом часу і областю простору. Ще один метод [8] полягає в тому, що урахується ймовірність об'ємної концентрації  $i$ -ої фази у певній точці простору. Для опису плоскої стаціонарної течії двофазного середовища звернемося до системи рівнянь, яка запропонована Селезньовим Л.І. у науковій праці [8]. При цьому приймаються припущення, що обидві фази середовища нестисливі, фазові переходи, зіткнення частинок дисперсної фази і їх дроблення

відсутні. У цьому випадку рівняння нерозривності і руху, записані для кожної фази окремо, мають вигляд:

$$\frac{\partial \varphi_1 u_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_1 v_2}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_2 u_2}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2 v_2}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \varphi_1 \left( u_1 \frac{du_1}{dx} + v_1 \frac{dv_1}{dy} \right) = \\ & = -\frac{\partial \varphi_1 p}{\partial x} + \varphi_2 \frac{dp}{\partial x} - \frac{3}{8} \frac{C_u}{r} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \rho_1 \varphi_2 - \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (v_1 - v_2) \omega_2 + \\ & + \mu_1 \left[ 2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \frac{du_1}{dx} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) \right] + \mu_1 \varphi_1 \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \varphi_1 \left( u_1 \frac{dv_1}{dx} - v_1 \frac{dv_1}{dy} \right) = \\ & = -\frac{\partial \varphi_1 p}{\partial y} + \varphi_2 \frac{dp}{\partial y} - \frac{3}{8} \frac{C_v}{r} (v_1 - v_2) |v_1 - v_2| \rho_1 \varphi_2 - \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (u_1 - u_2) \omega_2 + \\ & + \mu_1 \left[ 2 \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \frac{dv_1}{dy} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \left( \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) \right] + \mu_1 \varphi_1 \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 \varphi_2 \left( u_2 \frac{du_2}{dx} + v_2 \frac{du_2}{dy} \right) = \\ & = -\varphi_2 \frac{dp}{\partial x} + \frac{3}{8} \frac{C_u}{r} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| \rho_1 \varphi_2 + \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (v_1 - v_2) \omega_2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 \varphi_2 \left( u_2 \frac{dv_2}{dx} + v_2 \frac{dv_2}{dy} \right) = \\ & = -\varphi_2 \frac{dp}{\partial y} + \frac{3}{8} \frac{C_v}{r} (v_1 - v_2) |v_1 - v_2| \rho_1 \varphi_2 + \frac{3}{4} \varphi_2 \rho_1 (u_1 - u_2) \omega_2; \end{aligned} \quad (11)$$

де  $u$ ,  $v$  – компоненти швидкості за координатами  $x$  та  $y$ ;  $\varphi$  – термодинамічний потенціал фази;  $\rho$  – густина;  $p$  – тиск;  $\mu$  – динамічна в'язкість;  $\omega_2$  – кутова швидкість обертання частинок дискретної фази;  $C_i$ ,  $C_v$  – коефіцієнти опору, що ураховують сили аеродинамічного опору частинок дискретної фази.

Проекції сил опору представлені третіми членами правої частини рівнянь (8) та (9). Проекції підйомної сили виражені четвертими

членами правої частини рівнянь (8) і (9) і третіми членами в рівняннях (10) та (11). У рівняннях (6)–(11) параметри суцільного середовища позначені індексом 1, а дискретного – індексом 2. Біля стінок розпилювача утворюється прикордонний шар. При цьому біля стінки можуть виникнути газова і рідка плівки. За дискретної структури частинок у градієнтному полі швидкостей виникає обертальний рух дискретної фази. Взаємодія фаз супроводжується перенесенням маси, імпульсу, тепла і призводить до генерації підвищеної турбулентності. Звідси випливає, що структурні особливості двофазного середовища істотно впливають на формування і розвиток прикордонного шару, його відрив, а, отже, на опір обтічних поверхонь. Запишемо рівняння імпульсів для двокомпонентного шару – плівка на обтічній поверхні і газодисперсний шар над нею. Рівняння у формі Прандтля для кожної фази мають вигляд:

$$\frac{\partial u_1^2}{\partial x} - \frac{\partial(u_1 v_1)}{\partial y} = u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial \tau_1}{\partial y}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_2^2}{\partial x} - \frac{\partial(u_2 v_2)}{\partial y} = \frac{\rho_1}{\rho_2} u_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial \tau_2}{\partial y}. \quad (13)$$

У рівняннях (12) та (13) прийнято, що  $\frac{dp}{dx} = \rho_1 u_0 \frac{du_0}{dx}$ , і передбачається, що параметри на лінії розділу фаз мають розрив.

Рівняння нерозривності для кожної із фаз:

$$\frac{\partial(u_0 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(u_0 v_1)}{\partial y} = u_1 \frac{\partial u_0}{\partial x}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial(u_1 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(u_1 v_2)}{\partial y} = u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad (15)$$

де  $u_0$  – швидкість безперервної фази в початковому перерізі;  $u_i$ ,  $v_i$  – складові швидкості на межі розділу фаз (на зовнішній межі плівки);  $u_1$ ,  $v_1$ ,  $u_2$ ,  $v_2$  – поточні значення складових швидкості в газодисперсному шарі і в плівці.

Після перетворень рівняння імпульсів для прикордонного шару:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} \left( u_0^2 \delta_1^{**} + u_1^2 h^{**} \right) + u_0 \frac{du_0}{dx} \left( \delta_1^* + \frac{\rho_1}{\rho_2} \bar{h} \right) - \\ & - v_{1i} (u_0 - u_i) - \frac{du_i}{dx} \int_0^{\bar{h}} u_2 dy = \frac{\tau_0}{\rho_2} + \tau_i \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right). \end{aligned} \quad (16)$$



У цьому рівнянні товщина витіснення  $\delta_1^*$  і товщина втрати імпульсу  $\delta_1^{**}$  для газодисперсного середовища виражаються співвідношеннями:

$$\delta_1^* = \int_{\bar{h}}^{\delta_1} \left(1 - \frac{u_1}{u_0}\right) dy, \quad \delta_1^{**} = \int_{\bar{h}}^{\delta_1} \frac{u_1}{u_0} \left(1 - \frac{u_1}{u_0}\right) dy. \quad (17)$$

Аналогічні співвідношення для плівки мають вигляд:

$$\bar{h}^* = \int_0^{\bar{h}} \left(1 - \frac{u_2}{u_i}\right) dy, \quad \bar{h}^{**} = \int_0^{\bar{h}} \frac{u_2}{u_i} \left(1 - \frac{u_2}{u_i}\right) dy, \quad (18)$$

$$\int_0^{\bar{h}} \frac{d\tau}{dy} dy = \tau_i - \tau_0, \quad \int_{\bar{h}}^{\delta} \frac{d\tau}{dy} dy = -\tau_i, \quad (19)$$

де  $\bar{h}$  – середня товщина плівки;  $\tau_0$ ,  $\tau_i$  – напруження тертя на стінці і на зовнішньому кордоні плівки, тобто на межі розділу фаз.

Для прикордонного шару координати, що спрямовані за нормаллю до поверхні, змінюються в межах від  $y = 0$  до  $y = \delta = \bar{h} + \delta_1$ .

Конструкцію розпилювача можна вважати досконалою в аеродинамічному відношенні, якщо відсутній відрив прикордонного шару від стінки або якщо область відриву розташована як можливо нижче за течією. Для цього розрахунком визначають місце відриву прикордонного шару. Далі методом послідовного наближення визначають профіль проточної частини розпилювача, що задовольняє вказаним вище вимогам. Розрахунок необхідно доповнити експериментальними дослідженнями, у тому числі методами візуалізації течії [9].

Одним з ефективних прийомів зменшення втрат енергії при розпилюванні є визначення шляхів зниження ступеня нерівномірності поля швидкості в будь-якому перетині розпилювального пристрою. Рівномірність поля швидкості, в свою чергу, значно залежить від плавності переходу від одного перерізу до другого. У зв'язку із цим важливим є питання про забезпечення сполучення різних як завгодно малих ділянок каналу. Для вирішення цього питання звернемося до графоаналітичного методу конструювання поверхонь каналу.

Відповідно до цього методу, елементи перерізів визначаються із графіка площ шляхом перетворення через квадратичну параболу, як однопараметричні. Графіки зміни радіусів рівновеликих перерізів, що забезпечують плавність переходу від перерізу до перерізу, можуть бути визначені розрахунковим шляхом.

При побудові проточної частини установки вважаються заданими: вхідний і вихідний перерізи ділянки, що розглядається; графік зміни площ поперечних перерізів, які розташовані за нормаллю до осі (у загальному випадку вісь є просторовою кривою). Вісь проходить через центри ваги всіх проміжних перетинів.

Послідовність операцій при побудові проточної частини каналів приймається згідно методики, яка подана в праці [10]. Перетворюючи графік площ за допомогою квадратичної параболи, отримують графік радіусів рівновеликих колових перерізів.

На епюрі суміщених перерізів поєднують вхідний і вихідний перерізи проточної частини. Ця дія проводиться за їх центрами ваги і за напрямком головних осей шляхом нанесення радіальних променів. Для кожного променя визначають величини радіусів векторів вхідного  $\rho_{0j}$  і вихідного  $\rho_{nj}$  перерізів, за допомогою яких розраховують значення коефіцієнтів форми вхідного  $K_{0j}$  і вихідного  $K_{nj}$  перерізів за такою формулою:

$$K_{0j} = \rho_{0j} / R_0; \quad K_{nj} = \rho_{nj} / R_n, \quad (20)$$

де  $R_0, R_n$  – радіуси рівновеликого кола для вхідного і вихідного перерізів.

На осі ділянки розпилювача, що розглядається, вказують точки, через які будуть проходити проміжні перерізи. Після цього, задаючи закон зміни коефіцієнта  $K$  уздовж осі, визначають комплекс значень цих коефіцієнтів для кожного із проміжних перерізів:

$$K_{ij} = K_{0j} [1 - (L_j / L)] + K_{nj} (L_j / L), \quad (21)$$

де  $L$  – довжина осі;  $L_j$  – відстань уздовж осі до відповідного проміжного перерізу.

Помноживши комплекси радіальних коефіцієнтів  $K_{ij}$  на величину радіусів рівновеликих кіл для кожного проміжного перетину, отримують комплекси полярних радіусів цих перетинів:

$$\rho_{ij} = K_{ij} R_j. \quad (22)$$

Обчислені значення радіусів-векторів відкладають на відповідних променях на епюрі суміщених перерізів. Отримані дискретні точки з'єднуються плавною кривою, яка є шуканою твірною цього перерізу.

## Висновки

Профілювання твірних проточної частини на основі розрахунків прикордонного шару і побудова проточної частини графоаналітичним методом дозволяють сконструювати цей елемент розпилювача аеродинамічно раціональним із мінімізованими характеристиками втрат енергії.

**Список посилань**

1. Черненко, Є., Каліцький, О., Кондратюк, С. (2006). Все про гербіциди. Агроном, 2, 68–76.
2. Трибель, С.О., Ретьман, С.В., Борзих, О.І., Стригун, О.О. (2012). Стратегічні культури. Фенікс, Колобів, Київ, 368.
3. Борзих, О.І., Круть, М.В. (2019). База даних інноваційних розробок із захисту зернових культур в Україні. Захист і карантин рослин, 65, 3–16.
4. Сушко, І. (2002). Світові тенденції розвитку машин для хімічного захисту рослин. Пропозиція, 6, 95–99.
5. Рахматулин, Х.А. (1956). Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред. Прикладная математика и механика, 20(2), 184–195.
6. Драганов, Б.Х. (1965). К вопросу о движении многокомпонентной сжимаемой среды. Гидроаэромеханика, 2, 2–7.
7. Нигматулин, Р.И. (1978). Основы механики гетерогенных сред. Наука, Москва, 336.
8. Селезнёв, Л.И. (1978). Распределение гидрофазных флуктуаций в двухкомпонентной стабильной системе. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 6, 136–140.
9. Пастушенко, С.І., Міщенко, А.В. (2002). Удосконалення аеродинаміки силосопроводу методами візуалізації течії потоку. Вісник аграрної науки Причорномор'я, Миколаїв, 4(18), 2, 10–15.
10. Драганов, Б.Х., Круглов, М.Г., Обухова, В.С. (1987). Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей. Вища школа, Київ, 175.

## IMPROVEMENT OF SAPROPEL FERTILIZER PRODUCTION TECHNOLOGY

S. Khomych<sup>1\*</sup>, I. Tsiz<sup>1</sup>, V. Satsiuk<sup>1</sup>, V. Pavlik<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Pripyat-Stokhid National Nature Park, Liubeshiv, Ukraine



### Key words:

lake,  
sapropel,  
fertilizers,  
production of fertilizers,  
fertilizer production  
technology

### Article history:

Received 02.03.2021

Accepted 10.05.2021

### \*Corresponding author:

smhh@ukr.net

### ABSTRACT

*Today, the use of organic fertilizers or fertilizer, which includes organic components, to increase crop yields is very widespread. The use of organic fertilizer such as sapropel can also improve the structure and properties of the soil. Large deposits of lake sapropel, which can be used for the production of granular organic fertilizers, are situated in Volyn region. New technologies and machines must be developed for efficient sapropel extraction. The analysis of technological processes and machines for the organic sapropel fertilizer production is presented in the article. Based on the analyzed material, improved technological processes and machines and technology for the production of granular sapropel fertilizers are proposed. The proposed technology explains for us a clear idea of the complex of all processes of fertilizer production (from raw material production to packaging of the finished product). All processes, machines and equipment were selected taking into account the quality of the fertilizers. The peculiarity of the proposed technology is to combine different production processes into one with the creation of new machines taking into account the requirements for the product. New technology allows us to intensify the process, save a time and use energy efficiently. During the study, process modernization measures such as the extraction of organic sapropel deposits, sapropel transportation and sapropel placement in a geotube, sapropel mixing with minerals, sapropel grinding, sapropel final dehydration, sapropel granulation, granular sapropel separation and packaging were recommended. To implement these technological processes, the design of machines and equipment were proposed.*

УДК 631.8

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА  
САПРОПЕЛЕВИХ ДОБРИВ****С.М. Хомич<sup>1</sup>\*, І.Є. Цизь<sup>1</sup>, В.В. Сацюк<sup>1</sup>, В.А. Павлік<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>Національний природний парк “Прип’ять-Стохід”, Любешів, Україна**Ключові слова:**

озеро,  
сапропель,  
добрива,  
виробництво добрив,  
технологія  
виробництва добрив

**Історія публікації:**

Отримано 02.03.2021

Затверджено 10.05.2021

\***Автор для  
листування:**  
smhh@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

У статті представлено аналіз технологічних процесів і машин для виробництва добрив на основі озерного органічного сапропелю. На основі проаналізованого матеріалу запропоновано удосконалені технологічні процеси, машини і технологію виробництва гранульованих сапропелевих добрив. Опис технології пояснює комплекс технологічних операцій виробництва добрив, починаючи від добування сировини та закінчуючи фасуванням готового продукту. Усі етапи, операції, машини та обладнання виробничого процесу підібрані таким чином, щоб було забезпечено якісне, енергозберігаюче та екологічне виробництво добрив. Особливість запропонованої технології полягає у поєднанні кількох окремих виробничих процесів в один, для якого створені нові машини, які задовольняють вимоги виробництва. За рахунок цього досягається інтенсифікація процесу, економія часу та ефективне використання енергетичних ресурсів. За результатами дослідження рекомендується модернізувати два виробничі процеси: виробництва сировини (добування покладів органічного сапропелю, його транспортування і розташування в геотубі); виготовлення продукції (змішування з мінералами, подрібнення, кінцеве зневоднення, гранулювання, сепарування і фасування). Для реалізації удосконалених процесів виробництва добрив із сапропелю пропонуються конструкції машин. Необхідно зазначити, що конструкції запропонованих машин перебувають на стадії дослідження.

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.497>

### Стан питання та постановка проблеми

На сьогоднішній день набуває актуальності питання щодо використання альтернативних видів добрив з органічною складовою для підвищення урожайності сільськогосподарських культур. Підсилення органікою та збільшення вмісту гумусу потребують ґрунти, де тривалий час застосовувалися мінеральні добрива та пестициди. На цих ґрунтах помітно знижується урожайність навіть за сприятливих погодних умов та науково-обґрунтованих сівозмін. Тривале використання ріллі за таких способів господарювання призводить до виснаження ґрунту та його деградації. Тому один із шляхів відновлення родючості ґрунтів та збільшення гумусу – це створення сприятливого середовища для розвитку мікробіоактивних організмів, тобто примусове збільшення вмісту органіки, в якому будуть розвиватися мікроорганізми та буде відбуватися процес гуміфікації.

Аналіз наукових досліджень [1, 2] показує, що задовільні результати гуміфікації ґрунтів можна отримати використовуючи добрива, які виготовлені із органічного сапропелю. Окрім використання в якості добрива органічного сапропелю в природному вигляді (відлежаного чи замороженого до вологості 70–60%), також можна виготовляти і інші види добрив з нього (органо-мінеральні добрива (ОМД), орґано-мінеральні суміші (ОМС), компости, гумати).

Оглянувши джерела інформації [3–13], варто зазначити, що існує безліч технологій, машин та процесів, які забезпечують виробництво добрив на основі сировини із органічного озерного сапропелю. Разом із тим, лише окремі технології та машини були впроваджені у виробництво.

Ураховуючи специфіку розташування покладів органічного сапропелю, який може бути розташований в озерах у підводних родовищах, так званих відкритих водоймах, а також у закритих – болотяних родовищах під шаром торфу, можна прийти до висновку, що процеси добування органічної сировини з різного виду родовищ будуть суттєво відрізнятися. Тому саме від способу добування сировини залежать витрати енергії на виробництво добрив.

Проаналізувавши матеріали розробок технологій і машин та дослідження процесів виробництва добрив на основі органічного сапропелю [3–12] можна стверджувати, що всі дослідники користуються майже однотипною схемою. Відмінністю є лише застосування різних машин і обладнання, їх кількості та об'єми додаткових підготовчих робіт. Внаслідок цього технологічні процеси виготовлення сапропелевих добрив є надто енергоємними, що

зумовлює високу вартість продукції і, відповідно, низький попит на неї. З огляду на це, ці добрива виготовляють невеликими партіями під індивідуальне замовлення.

Порівняння існуючих технологій дозволило отримати згруповану послідовність робочих процесів виробництва добрив:

1. Добування сапропелю середнього і нижнього шару родовища, якщо добування відбувається з-під шару води (проводиться вакуумними насосами, екскаваторами, скреперами, гідроустановками), та екскавація, якщо добування відбувається з-під шару торфу (проводиться екскаваторами з додатковим використанням бульдозерів і землерийних машин для очищення від поверхневого торфу).

2. Додаткові роботи, що передбачають підготовку берегової території під розташування відстійників, відкритих та закритих площадок і майданчиків для розташування геотубів та розстилення шару сапропелю, якщо це можливо.

3. Транспортування сапропелю до берегової лінії, що відбувається із використанням пульпопроводів або вантажних барж, які потребують додаткової операції розвантаження.

4. Оброблення чи зневоднення:

- природне – відтікання у відстійниках, випаровування вологи на сонці, природне відтікання у геотубах, природне відтікання в буртах, відтікання на відкритих майданчиках із ворухінням;

- механічне – віджимання, сушіння, проморожування.

5. Транспортування, що передбачає перевезення органічної сировини у виробничі цехи.

6. Нормування, що передбачає дозування мінеральної частини або інших компонентів (соломи, тирси тощо) з органічною сировиною.

7. Виготовлення, що передбачає доведення сировини до необхідної вологості і її формування у пластинки, грудки, циліндри, кульки тощо, якщо це гранульовані ОМД, або ж змішування та диспергування, якщо це ОМС і гумати, або ж змішування і консервування, якщо це компости.

8. Фасування та пакування, що передбачають зважування готової продукції та затарювання в упаковку.

Крім того, виробництво сапропелевих добрив можливе із зміною описаної послідовності технологічних операцій, зокрема з пропусканням окремих операцій, що залежить від якісно-кількісних показників добрив, які необхідно забезпечити.

Кожен розробник технології виробництва формує послідовність процесів та підбирає машини індивідуально залежно від необхідної якості кінцевої продукції. Разом із тим, із урахуванням

багатокритеріальної оцінки це не завжди вдається, тому модернізація та вдосконалення технологій відбувається постійно. Крім того, для здешевлення виробництва готової продукції необхідно створювати нові високоефективні та енергозберігаючі машини.

Отже, удосконалення технології для масового виробництва добрив на основі сапропелю із зниженням енергозатрат є актуальним питанням сьогодення.

**Мета дослідження** – удосконалення технології виробництва добрив на основі органічного сапропелю шляхом модернізації виробничих процесів і машин.

### **Матеріали і методи**

Дослідження базувалися на основі системного аналізу стану проблематики та синтезі опрацьованого матеріалу. Модернізацію машин проводили шляхом створення інженерних рішень, які розроблялися в напрямі економічності, екологічності, ефективного використання енергетичного потенціалу та інтенсифікації процесів.

### **Результати дослідження та обговорення**

Надто повільний рівень розвитку нових технологій виробництва добрив на основі сапропелю в Україні і високий ступінь зношеності вітчизняної матеріально-технічної бази призвів до занепадання галузі. А технології, які рекомендовані закордонними дослідниками, не завжди забезпечують задовільні результати. Тому необхідно з обачністю ураховувати досвід закордонних вчених та використовувати його при реалізації власних розробок, оскільки сапропелі, що розташовані у різних місцевостях, мають свою специфіку.

Основними проблемами, які гальмують виробництво сапропелевих добрив в Україні та перешкоджають випуску конкурентоспроможної техніки, є:

- необдумане використання досвіду передових країн світу;
- ігнорування та неналежна увага до екологічних наслідків поетапного виконання технологічних процесів;
- низький рівень дослідження водного об'єкта;
- відсутність індивідуальних технологій, що призводить до збільшення енергозатрат та зниження якості продукції;
- відсутність спеціалізованої техніки, що призводить до погіршення показників сировини та ефективності її подальшого перероблення.

У будь-якому випадку необхідно зазначити, що підприємства та господарства в Україні тільки розпочинають займатися виробництвом сапропелевих добрив і не мають великого досвіду. Також, в свою чергу, це пояснюється відсутністю сучасної стратегії розвитку



аграрних підприємств в цьому напрямі, недостатньою підтримкою цього виду діяльності з боку держави та неналежним фінансуванням початково-розвиваючого виробництва. Отже, перш ніж розпочинати реалізацію технологічних рішень, необхідно схематично та послідовно представити план процесів виробництва. Також необхідно провести екологічний аудит місця розташування покладів, дослідити їх характеристики і властивості, зробити відповідні аналізи та представити висновки, а тоді вже займатися розробленням засобів для добування сировини та виробництва добрив. Із урахуванням висвітлених передумов, необхідно удосконалювати існуючі технології, а також розробляти конструкції спеціальних машин із використанням індивідуального підходу до кожного родовища з унеможливленням негативного впливу на екологічний стан водного об'єкта. Разом із тим, технологія має задовольняти потреби споживачів.

Рекомендується використовувати сапропель з відкритих озер із максимально можливим вмістом органічної речовини, але не нижче 50%. Оскільки таких покладів є досить багато, а озера постійно піддаються евтрофіюванню, тому необхідно одночасно проводити добувні і очисні роботи, які забезпечують відновлення водного об'єкта. Також рекомендується виробництво сипких гранульованих ОМД, оскільки вони забезпечують найбільший ефект під час використання, тому вони найбільш затребувані господарствами. У цьому випадку доцільно технологічний процес виконувати за схемою, що представлена на рисунку.

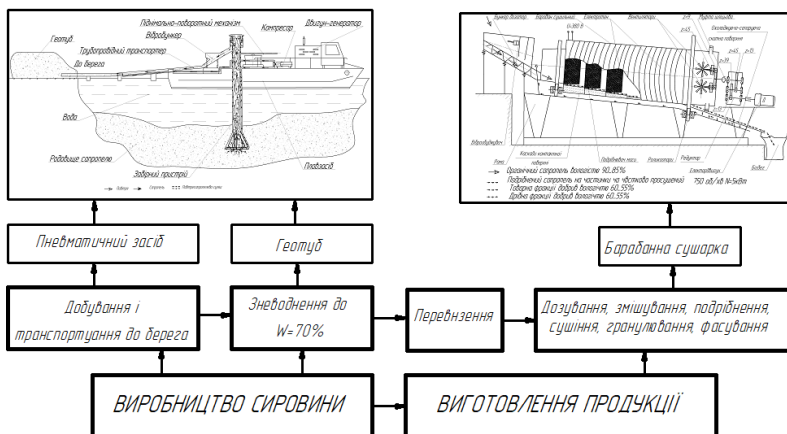


Рис. – Схема удосконаленої технології виробництва добрив на основі сапропелю

Удосконалену технологію пропонується поділити на два етапи (виробничі процеси): виробництво сировини та виготовлення продукції. Оптимізацію етапів необхідно провести в напрямі зменшення витрат енергії на технологічні операції та чисельності машин шляхом застосування багатофункціональних машин, які виконують кілька завдань одночасно. Важливим також є розроблення конструкцій нових машин для кожного етапу виробництва. Увагу необхідно зосередити на добуванні органічної сировини, оскільки від її якості залежать подальші витрати на наступні операції.

Обґрунтування доцільності представленої технології полягає в наступному:

- процес добування поєднати з транспортуванням до берегової лінії, використовуючи при цьому пневматичні (ерліфтні) засоби та пневматичне обладнання для транспортування покладів до берегової лінії з одночасним завантаженням у розташовані на березі геотуби, де проходить процес природного зневоднення;

- операцію перевезення застосовувати тільки у випадку розташування виробничого цеху на відстані; якщо є можливість розташовувати стаціонарні швидко розбірні виробничі цехи на березі озера, то необхідно скористатися такою можливістю, тоді доцільно замінити операцію транспортування на операцію перевантаження;

- виготовляти добрива з природно зневодненої сировини необхідно відразу (протягом кількох днів) без використання перевалочних операцій за рахунок застосування багатофункціональної машини;

- дозування та змішування сировини із мінералами необхідно проводити в бункері-дозаторі, з якого безперервно спрямовувати матеріал на подрібнення і сушіння з одночасним гранулюванням (гранули повинні мати грудкувату форму з еквівалентним діаметром 6–8 мм);

- пропонується доводити масу до вологості 60% у каскадних барабанних контактних сушарках із гранулюючими вальцями та решетами;

- після гранулювання проводити фасування продукції з подальшим зберіганням або реалізацією.

### **Висновки**

На основі проведеного огляду джерел науково-технічної інформації встановлено основні напрями вдосконалення технології виробництва сапропелевих органо-мінеральних добрив та запропоновано технологічну схему виробництва цих добрив. Підібрано технологічні операції та машини виробничого процесу і обґрунтована доцільність застосування кожної. У порівнянні із традиційними технологіями,

виробництво добрив за запропонованою схемою є енергозберігаючим та екологічним.

### Список посилань

1. Курдиш, И.К. (2001). Гранулированные микробные препараты для растениеводства. Наука и практика. РИВЦ, Київ, 141.
2. Шевчук, М.Й. (1996). Сапропелі України: запаси, якість та перспективи використання. Надстир'я, Луцьк, 383.
3. Русаков, Д.С., Дідух, В.Ф., Том'юк, В.В. (2014). Промислове виробництво органічних, органо-мінеральних та гранульованих добрив на основі сапропелів. Вісник Львівського національного аграрного університету, 18, 37–42.
4. Цизь, І.Є., Дідух, В.Ф. (2017). Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва органо-мінеральних добрив: монографія. Луцький НТУ, Луцьк, 185.
5. Овчинникова, К.Н., Гришаев, И.Г., Леонтьева, С.И. (1999). Создание технологий специальных комплексных удобрений. Химическая промышленность, 11, 52–54.
6. Бабенко, С.А., Семакина, О.К., Бокуцова, К.П., Лиханова, О.В. (2005). Разработка технологии гранулирования органоминеральных удобрений на основе озерных сапропелей. Известия Томского политехнического университета, 308(1), 119–122.
7. Цизь, І.Є., Хомич, С.М., Сацюк, В.В. (2021). Аналіз технологій та техніки для добування сапропелю. В: Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference Munich, Germany, 228–234.
8. Тарасюк, В.В., Дідух, В.Ф., Тараймович, І.В. (2010). Конструктивні особливості формування гранул при виробництві ОМД на основі сапропелю. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 40(2), 112–115.
9. Люшик, І.М., Тарасюк, В.В., Матчук, А.Л. (2011). Технологія добування озерних сапропелів та виробництво ОМД на їх основі. Наукові нотатки, 34, 107–110.
10. Дідух, В.Ф., Тараймович, І.В., Тарасюк, В.В., Русаков, Д.С. (2011). Дослідження процесу формування гранул органо-мінеральних добрив методом обкочування. Механізація сільськогосподарського виробництва, 107(1), 387–394.
11. Шевчук, М.Й., Дідух, В.Ф. (2000). Виробництво і використання органо-мінеральних добрив. Вісник аграрної науки, 2, 9–12.
12. Хлопецький, Р.А. (2015). Технологія виготовлення органічних добрив з використанням озерного сапропелю. Природне агрогосподарство в Україні, 390–394.
13. Babenko, S.A., Semakina, O.K., Djabarova, N.K. (1998). Production the grained complex manures. In: KORUS-98: The Second Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology, Tomsk, 103.

## IMPROVING THE EFFICIENCY DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF SEEDER HORSCH PRONTO DC

V. Shevchuk, O. Sukach\*, Yu. Gabriel, G. Khudaverdyan

Lviv National Agrarian University, Lviv, Ukraine



### Key words:

sowing complex,  
electronic control system  
of the seeder,  
training stand,  
diagnostics,  
seeder

### Article history:

Received 15.04.2021

Accepted 15.05.2021

### \*Corresponding author:

19oleg85@ukr.net

### ABSTRACT

*Sowing complexes perform several operations simultaneously, such as soil preparation and leveling, surface formation for sowing, sowing, seed rolling, and fertilizer application. Electronic control systems are used for efficient operation of sowing complexes. The method of diagnostics of electronic control system of modern sowing complexes is proposed in the article. The use of electronic systems allows us to automatically control the quality of sowing, adapt the work of the seeder to changes in movement parameters, and display the basic parameters of the system during operation, signal faults or non-compliance with agronomic requirements. To study the structure, principle of operation, settings and maintenance of the seeder, it is convenient to use training stands, the advantage of which is the compactness and convenience of the main elements of the electronic control system, and its use does not require significant time and resources, additional equipment and machinery. During the research, the characteristics and parameters of the sensor output signals for different operating modes were established. The principles of operation of the on-board network and data transmission technology of the main elements of the electronic control system of the drill are clarified. According of change oscillograms of information signals, the normative diagnostic parameters of the seeder sensors are set, which in the future will provide faster and more efficient diagnostics. Optical sensors have been found to use the UART data transmission protocol. One of the contacts of the seeding control sensor connector is the receiver (RX) and the other is the transmitter (TX) of the digital signal, which allows us to place a large number of sensors on one data line.*

УДК 631.331

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СІВАЛКОЮ HORSCH PRONTO DC****В.В. Шевчук, О.М. Сукач\*, Ю.І. Габрієль, Г.А. Худавердян**

Львівський національний аграрний університет, Львів, Україна

**Ключові слова:**

посівний комплекс,  
електронна система  
керування сівалкою,  
навчальний стенд,  
діагностика,  
сівалка

**Історія публікації:**

Отримано 15.04.2021

Затверджено 15.05.2021

**\*Автор для****листування:**

19oleg85@ukr.net

**АНОТАЦІЯ**

*У статті запропоновано методику діагностики електронних систем керування, якими оснащені сучасні посівні комплекси. Використання електронних систем дозволяє в автоматичному режимі контролювати якість посіву, адаптувати роботу сівалки до зміни параметрів руху, відобразити основні параметри системи під час роботи, сигналізувати про несправності чи недотримання агротехнічних вимог. Для вивчення будови, принципу роботи, налаштувань й технічного обслуговування сівалки зручно використовувати навчальні стенди, перевагою яких є компактність та зручність розташування основних елементів електронної системи керування, а його використання не потребує значних затрат часу й ресурсів, застосування додаткового обладнання й техніки. Визначено характеристики та параметри вихідних сигналів сенсорів за різних режимів роботи. З'ясовано принципи роботи бортової мережі та технології передачі даних основних елементів електронної системи керування сівалкою. За характером та закономірностями зміни отриманих осцилограм інформаційних сигналів встановлено нормативні діагностичні параметри сенсорів сівалки, що в подальшому забезпечить швидку та ефективну діагностику. Встановлено, що оптичні сенсори використовують UART протокол передачі даних. Один із контактів роз'єму сенсора контролю висіву є приймачем (RX), а другий – є передавачем (TX) цифрового сигналу, відповідно, це дозволяє розташувати велику кількість сенсорів на одній лінії передачі даних. Результати досліджень забезпечать швидку діагностику техніки.*

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.499>

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

Посівні комплекси забезпечують високі стандарти технологічної ефективності та продуктивності [1]. Крім того, їх використання забезпечує значне скорочення термінів посівних робіт. Удосконалення посівних машин проводиться із урахуванням того, що вони одночасно за один прохід мають забезпечити підготовку та вирівнювання ґрунту, формування насінневого ложа та його ущільнення, прикочування посівів та внесення добрив. Також важливими напрямками удосконалення посівної техніки є забезпечення рівномірності та точності висіву насіння різних сільськогосподарських культур, а також підвищення швидкості руху агрегату полем [2–5].

Одночасне забезпечення великої кількості агротехнологічних вимог зумовлює необхідність застосування складних технологічно-конструктивних систем під час розроблення сільськогосподарської техніки. Крім того, значна кількість інтегрованих взаємопов'язаних систем вимагає знання принципів їх функціонування, налаштування й технічного обслуговування [4, 5].

**Мета дослідження** – розроблення обладнання та методики для встановлення основних діагностичних параметрів сівалок, які оснащені електронними системами керування. Вихідними умовами створення такого обладнання є компактність та зручність розташування основних електронних елементів, мала метало- та матеріалоемність, а також те, що його використання не потребувало б значних затрат часу й ресурсів, застосування додаткового обладнання й техніки (трактора для агрегування тощо) [6].

### **Матеріали і методи**

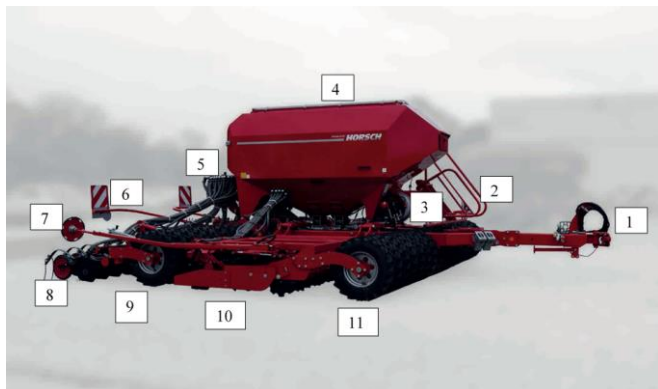
Для проєктування та візуалізації обладнання, що проєктується, використано програму КОМPAS-3D V14. Нестандартні елементи виготовлені за допомогою 3D-друку. Для цього проведено попереднє оброблення моделей за допомогою слайсера Cura Ultimaker v.3.4.1 і в результаті оброблення отримано g-code для 3D-принтера Printo H3.

Справність ланцюгів живлення електричних та електронних систем перевірялася цифровим автоматичним мультиметром UNI-T UT61D, а діагностика сенсорів проводилася за допомогою портативного ПК та цифрового осцилографа Hantek 1008B.

### **Результати дослідження та обговорення**

Посівні комплекси HORSCH серії PRONTO DC – це сучасні та високопродуктивні машини зі значними габаритами та масою (рис. 1) [1]. Робоча ширина посіву комплексів цієї серії в межах 3–12 м, а кількість сошників може сягати 60 шт. Сучасна посівна техніка, яка

переміщується полем на високих швидкостях, для забезпечення рівномірності та заданої норми висіву обладнана електронними системами керування. Використання електронних систем дозволяє в автоматичному режимі контролювати якість посіву, адаптувати роботу сівалки до зміни параметрів руху або ж сигналізувати оператору про певні несправності чи недотримання агротехнічних вимог [7, 8].

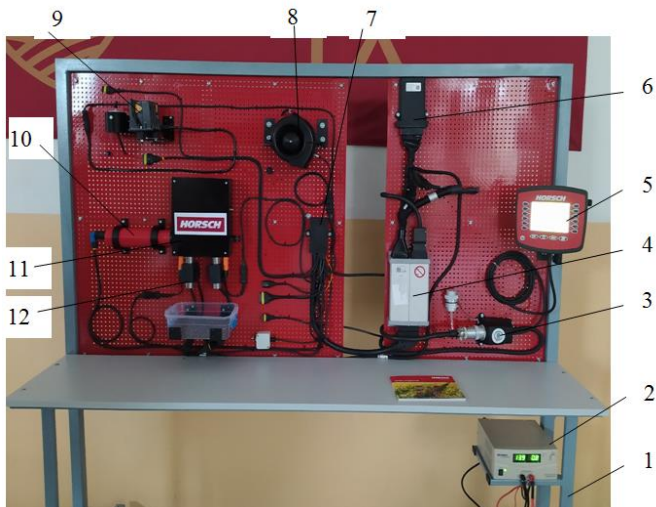


**Рис. 1** – Посівний комплекс HORSCH серії PRONTO DC:

- 1 – тягове дишло; 2 – підніжка; 3 – нагнітач повітря;
- 4 – двосекційний бункер; 5 – розподільник посівного матеріалу;
- 6 – система освітлення; 7 – маркер колії; 8 – посівні сошники TurboDisc; 9 – шинні ґрунтоущільнювачі; 10 – дворядна дискова система; 11 – первинні ґрунтоущільнювачі

Налагодження коректної роботи сівалки передбачає підготовку її механічної частини, гідравлічної й пневматичної систем, системи електронного керування та значної кількості програмних налаштувань. Вивчення програмного меню, встановлення заданої норми висіву, калібрування сенсорів та виконавчих механізмів більш доцільно проводити із використанням навчального обладнання, що повністю відтворює роботу електронної системи керування. Із цією метою було спроектовано та виготовлено навчальний стенд (рис. 2) для вивчення будови, налаштування й діагностики електронної системи керування сівалкою [9].

Живлення електричної та електронної систем сівалки відбувається від електромережі трактора-тягача напругою 12 В, а обмін даними за допомогою протоколу ISOBUS із використанням лише одного кабелю з дев'ятиконтактним з'єднувачем [1].



**Рис. 2** – Навчальний стенд на базі електрокомпонентів сівалки серії PRONTO DC (HORSCH):

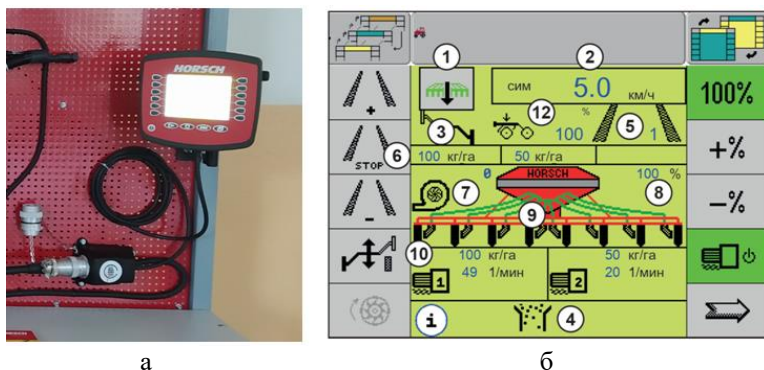
- 1 – монтажна рама; 2 – блок живлення (0–24 В);
- 3 – монтажний комплект ISOBUS із подовженим кабелем;
- 4 – робочий комп’ютер E-Manager Midi 3.0; 5 – сумісний з ISOBUS термінал; 6 – модуль контролю висіву; 7 – монтажний комплект DrillManager ISOBUS з подовженим кабелем; 8 – нагнітач повітря; 9 – радіолокаційний радар швидкості; 10 – електропривод котушки дозатора; 11 – корпус дозатора; 12 – система контролю висіву

Повний контроль за роботою усіх систем сівалки здійснює робочий комп’ютер E-Manager Midi 3.0, тоді як відображення даних та зміна конфігурації налаштувань проводиться за допомогою цифрового терміналу з програмним інтерфейсом. Він отримує інформацію від сенсорів, обробляє її і передає в контролер трактора, який за необхідності видає керуючі команди електроприводу або гідравлічній системі трактора, при цьому усі ключові показники відображаються на екрані терміналу [1].

Після вмикання терміналу завантажується перша сторінка програмного меню (рис. 3). Розташування й індикація на дисплеї залежать від можливостей налаштування та додаткового оснащення техніки. Друга сторінка відображає налаштування електронної системи керування. Третя сторінка використовується переважно для встановлення норми висіву, налаштування чутливості системи



контролю подачі посівного матеріалу та для пошуку несправностей при засміченні чи пошкодженні сенсорів.



**Рис. 3** – Термінал сумісний з ISOBUS 2015 (а) та перша сторінка програмного меню терміналу (б)

Контекстне меню представлено у вигляді таких інформаційних блоків відповідно до позначення на рис. 3, б:

1. Індикація для робочого положення сівалки.
2. Індикація дійсної або заданої швидкості руху.
3. Вибір положення маркера колії.
4. Функція контролю подачі посівного матеріалу.
5. Номер технологічної колії, що відповідає номеру неактивного посівного сошника.
6. Індикація вихідної кількості посівного матеріалу або добрив у кілограмах на гектар.
7. Індикація частоти обертання вентилятора нагнітача повітря.
8. Індикація у відсотках дійсної норми висіву відносно заданої.
9. Робоче положення посівних сошників.
10. Відображення актуальних даних частоти обертання ротора дозатора.
11. Індикація площі в гектарах і відрізка в метрах, які можна обробити з поточним завантаженням бункера.
12. Регулятор тиску сошників (встановлений гідравлічний тиск притискання сошників).

Перед початком посіву проводиться налаштування норми висіву та калібрування дозатора (рис. 4). Як правило, ця операція проводиться у триразовій повторності з метою виключення похибки [10–13].

На наступному етапі підготовки проводиться калібрування нагнітача повітря, що передбачає програмні налаштування й встановлення кодованого числа імпульсів давача відносно реальної частоти обертання вентилятора нагнітача повітря.

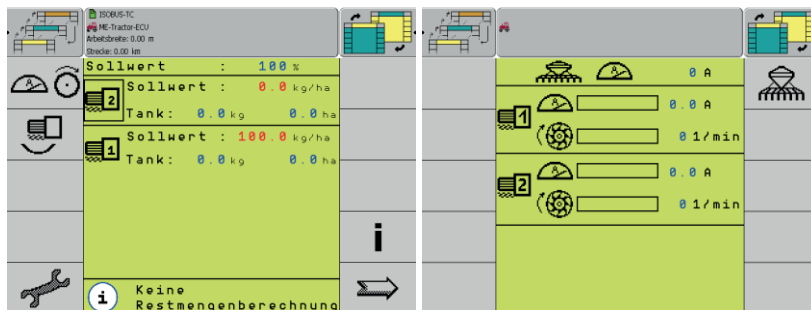


Рис. 4 – Фрагмент налаштування норми висіву та калібрування дозатора

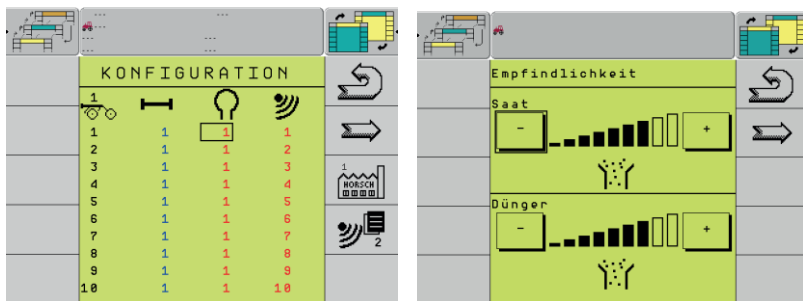
Після визначення контурів міжрядь посіву необхідно визначити число встановлених сенсорів, які здійснюють контроль подачі посівного матеріалу. Як правило, вони визначаються автоматично, а зміни вносяться лише тоді, коли кількість сошників і сенсорів не збігається або ж при виході із ладу сенсора (рис. 5).

Для визначення справності ланцюгів живлення, електричних та електронних систем сівалки можна використовувати цифрові мультиметри, тоді як для якісної діагностики сенсорів контролю висіву, радарних сенсорів швидкості, сенсорів частоти обертання вентилятора та дозатора необхідно застосовувати осцилографи. За характером осцилограми інформаційного сигналу можна отримати достовірні дані щодо справності та коректності роботи вказаних сенсорів. Оскільки технологічний процес посіву насіння повністю контролюється складною електронною системою керування, то на основі цього можна визначити такі види несправностей [14, 15]:

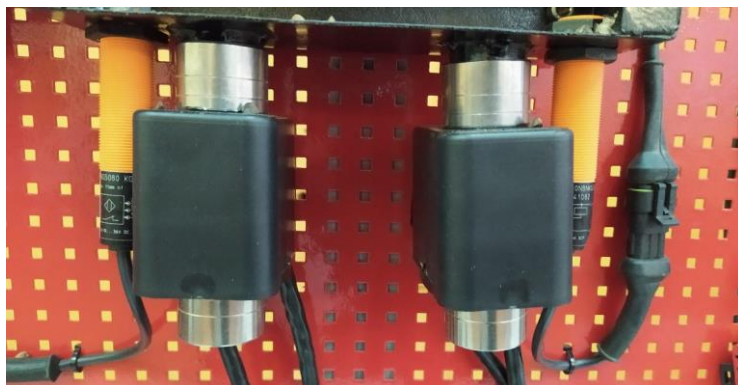
- пошкодження ланцюгів живлення;
- повне ушкодження або несправність сенсора;
- некоректна робота сенсора (наявність імпульсів та передача невірних сигналів);
- невідповідність програмних налаштувань (перетворення фізичних імпульсів у програмні коди).

Для визначення справності основних електричних та електронних систем сівалки було знято осцилограми із сенсорів контролю висіву,

радарного сенсора швидкості та сенсора частоти обертання вентилятора. Оскільки сенсори контролю заповнення бункера є аналогічними до сенсора швидкості вентилятора, то сигнал із цих сенсорів досліджувався за аналогічною методикою – із використанням двох каналів цифрового осцилографа.



а



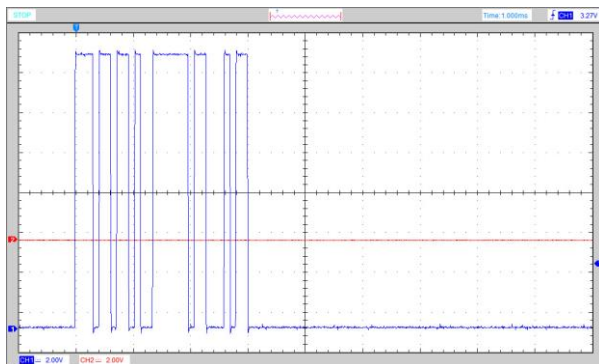
б

**Рис. 5** – Налаштування та калібрування датчиків контролю висіву та заповнення бункера:

а – програмні налаштування; б – оптичні сенсори контролю висіву

Сенсори контролю висіву оснащені чотириконтактними роз'ємами та з'єднані паралельно в мережу. Можна припустити, що ці сенсори використовують цифровий сигнал передачі даних. Провівши вимірювання встановлено, що перший та четвертий контакти роз'єму задіяні для живлення сенсора (12 В). На другому контакті генерується сигнал, що зображений на рис. 6. Форма осцилограми інформаційного

сигналу (рис. 6) не змінювалася залежно від того, чи пролітає насіння через будь-який із сенсорів, чи ні.



**Рис. 6** – Форма інформаційного сигналу на другому контакті роз'єму оптичних сенсорів контролю висіву

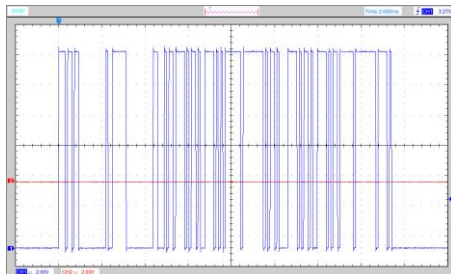
Шляхом вимірюванні отримані осцилограми на третьому контакті роз'єму за різних умов роботи: немає потоку насіння (рис. 7, а); насіння надходить лише через перший сенсор (рис. 7, б); насіння надходить через два сенсори одночасно (рис. 7, в).

Аналізуючи отримані осцилограми можна припустити, що сенсори використовують UART протокол передачі даних. У цьому випадку другий контакт роз'єму сенсора контролю висіву є приймачем (RX), а третій контакт – є передавачем (TX) цифрового сигналу [14, 15]. Використання цього протоколу передачі даних дозволяє розташувати велику кількість сенсорів на одній лінії передачі даних. Крім того, можна виявляти із якого сенсора надходить інформаційний сигнал. Завдяки такій реалізації можливо проводити діагностику працездатності кожного окремого сенсора висіву.

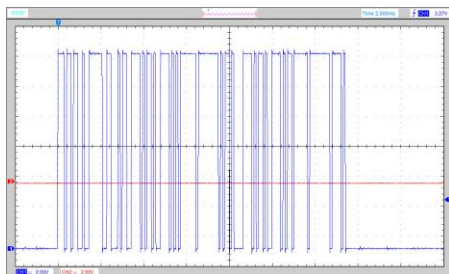
На рис. 8 відображено фрагмент дослідження радіолокаційного сенсора швидкості руху агрегату. Зміна швидкості проводилася за допомогою імітатора руху, а частота обертання змінювалася ШІМ регулятором потужністю 1,5–16 В. Це дозволяє отримати характеристику імпульсів, і, відповідно, радара у цілому діапазоні зміни швидкості руху сівалки.

Як видно із осцилограм (рис. 8, б) сигнал має прямокутну форму із коефіцієнтом наповнення 50%. При збільшенні швидкості зростає частота сигналу, причому вона зростає прямопропорційно. Таким чином, вимірюючи частоту сигналу головний блок керування має

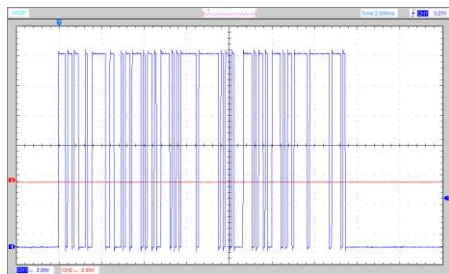
можливість отримувати значення поточної швидкості руху сівалки. Якщо в реальних умовах швидкість сівалки за показами радіолокаційного сенсора не співпадає із реальною, то в системі можна провести корекцію швидкості до заданих умов.



а



б

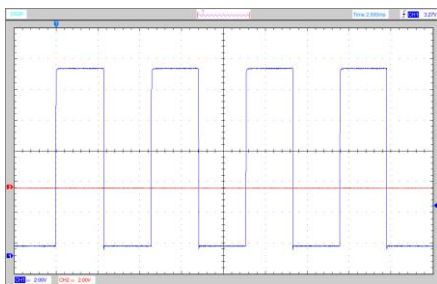


в

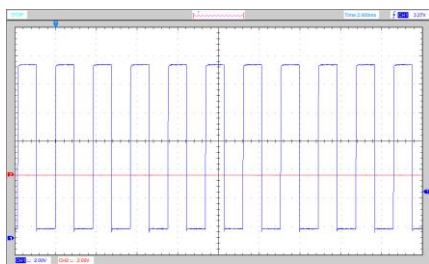
**Рис. 7** – Форма інформаційного сигналу на третьому контакті роз'єму оптичних сенсорів контролю висіву за умов:  
а – насіння надходить через два сенсори; б – насіння надходить через перший сенсор; в – насіння надходить через другий сенсор



а



б



в

**Рис. 8** – Дослідження радіолокаційного сенсора швидкості руху:

а – фрагмент випробування;

б – форма інформаційного сигналу за швидкості 3 км/год.;

в – форма інформаційного сигналу за швидкості 10 км/год.

### Висновки

Посівні комплекси – це високопродуктивні машини зі значними габаритами та масою, в яких широко використовуються електронні

системи керування робочими процесами. Використання електронних систем дозволяє в автоматичному режимі контролювати якість посіву, адаптувати роботу сівалки до зміни параметрів руху або ж сигналізувати оператору щодо певних несправностей чи недотримання агротехнічних вимог.

Значна кількість інтегрованих взаємопов'язаних систем вимагає знання принципів їх функціонування, налаштування й технічного обслуговування. Для цього зручно використовувати навчальні стенди, перевагою яких є компактність та зручність розташування основних елементів електронної системи керування. Використання стенду не потребує значних затрат часу й ресурсів, а також застосування додаткового обладнання та техніки. В інженерно-технічних службах аналогічне обладнання використовується для вивчення програмного меню, встановлення заданих норм висіву, способів налаштування та калібрування основних сенсорів і виконавчих механізмів.

Під час досліджень встановлено принципи роботи та технології передачі даних основних елементів електронної системи керування сівалкою. За характером та закономірностями зміни осцилограм інформаційних сигналів встановлено основні діагностичні параметри сенсорів сівалки. Використання результатів дослідження забезпечить більш швидку діагностику й значно підвищить ефективність технічного обслуговування аналогічної посівної техніки.

### Список посилань

1. HORSCH Pronto DC. <https://www.horsch.com/ru/produkty/mashiny-dlja-poseva/diskovye-posevnye-kompleksy/pronto-dc>
2. Сало, В.М., Лузан, П.Г. (2014). Напрями вдосконалення технічного забезпечення новітніх технологій прямої сівби зернових культур. Техніка і технології АПК, 9, 14–17.
3. Хітров, І.О., Бундза, О.З., Бабич, О.Я. (2018). Організація технічного сервісу машин дилерським підприємством. Сільськогосподарські машини, 40, 121–130.
4. Лупенко, Ю.О., Малік, М.Й., Шпикуляк, О.Г. (2014). Інноваційне забезпечення розвитку сільського господарства України: проблеми та перспективи. ННЦ ІАЕ, Київ, 516.
5. Адамчук, В.В., Грицишин, М.І. (2012). Система техніко-технологічного забезпечення виробництва продукції рослинництва. Аграрна наука, Київ, 416.
6. Шевчук, В., Сукач, О. (2019). Використання стенда для дослідження пневматичної гальмівної системи автомобіля. В: III Всеукраїнська науково-теоретична конференція: Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання (Львів, Україна). Посвіт, Дрогобич, 20–21.
7. Dnes, V., Kudrynetskyi, R., Skibchuk, V. (2021). Методичні засади визначення ефективності використання техніки під час обробітку ґрунту,

- внесення добрив і сівби ярих культур за енергетичним показником. Агроінженерні дослідження, 24, 77–82. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.077>
8. Сівалку оцінюють за сходами. [https://www.poettinger.at/uk\\_UA/Newsroom/Artikel/11618](https://www.poettinger.at/uk_UA/Newsroom/Artikel/11618)
  9. Аулин, В.В., Панков, А.А., Черновол, М.И., Стахорская, А.Г. (2017). Автоматизация регулирования нормы высева на основе мехатронной реализации программно-аппаратного обеспечения. Вісник інженерної академії України, 3, 240–244.
  10. Пастухов, В.І. Бакум, Н.В., Михайлов, А.Д., Кириченко, Р.В. (2015). До розробки мехатронних систем посівних машин. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 156, 156–162.
  11. Аніскевич, Л.В. (2014). Управління системами високоточного дозування технологічних матеріалів. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК, 196, 264–277.
  12. Попович, О.М. (2010). Автоматичні системи управління посівними машинами. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК, 144, 118–125.
  13. Bishop, R.H. (2002). The mechatronics handbook. CRC Press, Boca Raton, 1229.
  14. Мигаль, В.Д. (2017). Мехатронні та телематичні системи: монографія. Вид-во Майдан, Харків, 307.
  15. Мигаль, В.Д. (2017). Системы контроля и диагностирования автомобиля: учеб. пособие. Изд-во Майдан, Харьков, 605.



## THE MOISTURE INFLUENCE ON THE CUTTING EFFORT OF OIL BAST CROP BIOMASS

S. Yaheliuk<sup>1\*</sup>, V. Didukh<sup>1</sup>, T. Artyukh<sup>2</sup>, O. Holiy<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>State Enterprise “Experimental Research Farm ELITA”, Rokyni, Ukraine



### ABSTRACT

*The unique properties of bast crops determine the wide possibilities and waste-free using of these crops. Countries, where traditionally fibre flax is grown, are beginning to grow oil flax and hemp. This is due to the properties of the bast crops. The biomass, which remains after harvesting of bast crops for seeds, can be used to produce various products. The high yield of the oil flax stem in some geographical regions of Ukraine complicates the application of traditional technology of oil flax harvesting, which involves using the harvesters. Modern agro and industrial production involves using new universal, energy conservation and environmental technologies and stuffs, which can be quickly reconfigured to obtain products of various applications. It is possible to obtain technical fiber and solid fuel materials from the bast crop biomass after harvesting the seeds. Possibility of obtaining fiber suitable for the textile industry from the bast crops biomass (for example, oil flax and hemp) is being researched. Cutting is one of the most commonly used operations in harvesting and processing. It has its own characteristics for bast crops, because their technological characteristics (type, variety, moisture) must be taken into account. The paper shows the results of study the cutting effort of flax stems. The necessary to take into account not only the maturity phase, the type and variety of flax, but the moisture of plants during cutting (grinding) the bast crop biomass was found. Also, studies have shown that the stems of oil flax straw have less resistance to cutting. The studies make it possible to value the stem part potential of the bast crops for the possibility further use.*

### Key words:

flax,  
flax stem,  
flax stem characteristics,  
moisture of flax stem,  
flax stem cutting

### Article history:

Received 21.03.2021

Accepted 10.05.2021

\*Corresponding author:  
cler2010@gmail.com

УДК 677.11:677.021.15

**ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ БІОМАСИ ОЛІЙНИХ ЛУБ'ЯНИХ КУЛЬТУР  
З УРАХУВАННЯМ ВОЛОГОСТІ****С.В. Ягелюк<sup>1\*</sup>, В.Ф. Дідух<sup>1</sup>, Т.Н. Артюх<sup>2</sup>, О.В. Голій<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна<sup>3</sup>ДПЕДГ “Еліта” Волинської ДСГДС ІК НААН, Рокині, Україна**Ключові слова:**

льон,  
стебло льону,  
характеристики стебла  
льону,  
вологість стебла льону,  
різання стебла льону

**Історія публікації:**

Отримано 21.03.2021

Затверджено 10.05.2021

**\* Автор для****листування:**

cler2010@gmail.com

**АНОТАЦІЯ**

Сучасне агропромислове виробництво передбачає використання нових універсальних, екологічних та енергозберігаючих технологій і засобів, які можуть бути швидко переналаштовані для випуску продукції різного функціонального призначення. Встановлено, що з біомаси олійних луб'яних культур після збирання насіння можна отримати технічне волокно та тверді паливні матеріали. Науковці досліджують можливість отримання з біомаси олійних луб'яних культур (наприклад, льону олійного та конопель) волокна, придатного для текстильної промисловості. Різання – це одна з операцій, що найчастіше використовується у технологіях збирання, оброблення й перероблення рослинних матеріалів. Вона має свої особливості для луб'яних культур, адже повинні бути ураховані їх технологічні характеристики (вид, сорт, вологість). У статті представлені результати дослідження зусилля різання стебел льону. У результаті проведених досліджень на прикладі льону олійного та льону-довгунця встановлено, що під час різання (подрібнення) біомаси олійних луб'яних культур потрібно ураховувати не тільки фазу стиглості, вид й сорт льону, але й вологість стебла. Також дослідження показали, що стебла льону олійного чинить менший опір різанню, ніж стебла льону-довгунця. Проведені дослідження дозволяють оцінити потенціал стеблової частини урожаю олійних луб'яних культур як сировини для подальшого використання.

---

<https://doi.org/10.36910/acm.vi46.496>

---

### Стан питання та постановка проблеми

Унікальні властивості олійних луб'яних культур обумовлюють широкі можливості та безвідходність їх використання [1–3]. Країни, що традиційно вирощували льон-довгунець, починають вводити у сівозміни льон олійний та коноплі (Франція, Бельгія, Польща, Україна). Також виробники звертають увагу на властивості луб'яних культур. Доведено можливість отримання різної продукції із біомаси, що залишається після збирання олійних луб'яних культур на насіння.

Висока урожайність стеблової частини льону олійного в окремих географічних регіонах ускладнює застосування традиційної технології збирання льону олійного, яка передбачає використання зернозбиральних комбайнів. Необхідно зазначити, що традиційна технологія збирання льону-довгунця не передбачає його скошування.

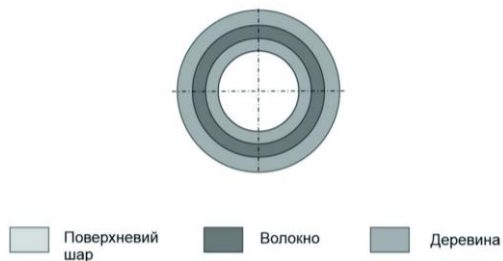
Сучасні дослідження показують необхідність та можливість перероблення біомаси олійних луб'яних культур у продукцію різного функціонального призначення [3]. Для цього потрібно розробити нові технології збирання, оброблення й перероблення цих культур, а також відповідні робочі органи машин для їх реалізації. Вітчизняні та закордонні науковці проводять такі дослідження. Так, Манковські Є. та інші у науковій праці [4] запропонували технологію скошування льону-довгунця і вказали труднощі та переваги її застосування. Крім того, Нілсон Д. і Карлсон С. продемонстрували необхідність комплексного дослідження впливу погодних умов на формування технологічних параметрів луб'яних культур [5]. Моррісон У., Арчибальд Д. у праці [6] досліджували вплив технологій природного та штучного мочіння трести на формування міцності волокна льону. Дослідження, що проводилися у Луцькому національному технічному університеті, показали доцільність використання роздільної технології збирання льону. У науковій праці [7] розглянута можливість штучного зволоження біомаси луб'яних культур. У праці [8] запропонована модель збирання та оброблення льону з урахуванням його біологічних та технічних характеристик, а у працях [8–10] – послідовність технологічних операцій для збирання та оброблення льону. Процеси різання рослинної сировини досліджували Дідух В., Онюх Ю., Шеїна А., Заплетніков І. та інші [11, 12]. Головенко Т. та Бойко Г. встановили основні технологічні характеристики льону олійного [13]. Огляд досліджень напрямів удосконалення технологій збирання, оброблення та перероблення біомаси олійних луб'яних культур показав, що в основі багатьох операцій оброблення та перероблення передбачена необхідність різання стеблової частини. Однак, є відмінності технологічних характеристик луб'яних культур, на які

необхідно зважати. На їх формування впливає біологічний вид, сорт, географічне розташування місця вирощування, погодні умови та інші фактори. Тому є необхідність дослідити зусилля різання одиночного стебла та групи стебел біомаси олійних луб'яних культур (на прикладі льону) залежно від його фізичних і технологічних характеристик.

**Мета дослідження** – визначити зусилля, що необхідне для різання окремих стебел і груп стебел льону-довгунця та льону олійного.

### Матеріали і методи

Для дослідження операцій подрібнення, руйнування, деформації, зміни пружних властивостей біомаси олійних луб'яних культур проведено аналіз формування стебла льону протягом вегетації. Будова стебла льону, з механічною точкою зору, це складна пустотіла циліндрична балка [1, 2]. Стебло має значні відмінності залежно від виду льону та фази стиглості. Для спрощення дослідження процесу різання біомаси олійних луб'яних культур запропонована модель стебла, що схематично представлена на рис. 1.



**Рис. 1** – Схема стебла льону у перерізі (модель)

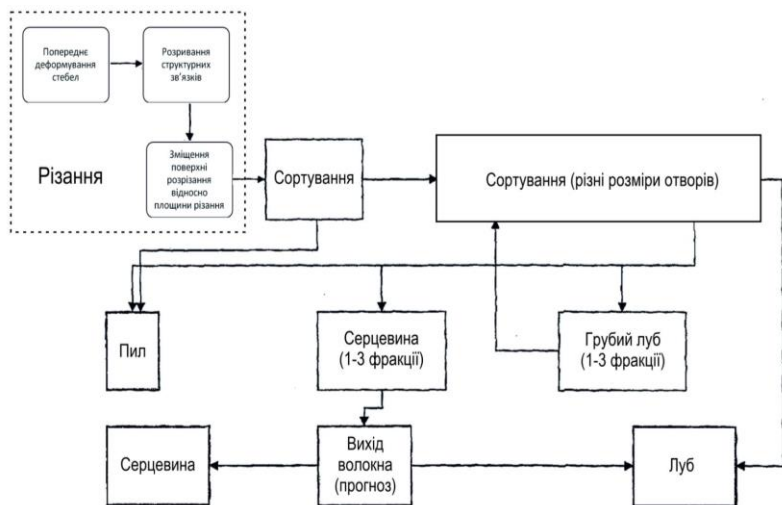
Відповідно до досліджень [11, 12, 14, 15] процес подрібнення стебел льону можна представити у вигляді схеми (рис. 2).

Процес різання стебла складається із декількох фаз. Попереднє деформування стебла залежить від відстані та форми опорних поверхонь різання, розривання структурних зв'язків залежить від виду, фази стиглості та вологості, а зміщення поверхні розрізання щодо площини різання – від форми та геометричних параметрів ножа.

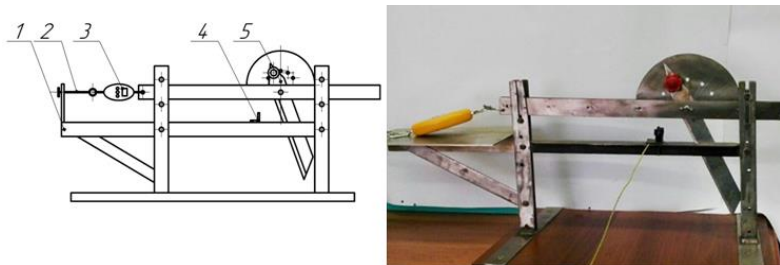
Для визначення зусилля різання біомаси стебел льону використовували лабораторну установку, що зображена на рис. 3. Установка містить упорну раму, захват, динамометр, фіксатор та ніж гільйотинного типу.

Дослідження проводили на стеблах льону олійного (сорт: Орфей, Південна ніч, Айсберг) та льону-довгунця (сорт: Глінум, Гладіатор).

Для отримання зразків із різною вологістю під час експерименту використовували свіжовибрані та триденного вилежування стебла. Досліджували одиночні стебла та групи з трьох і п'яти стебел льону. Величину зусилля різання визначали на трьох ділянках: біля окоренка, на середній та верхівковій частинах стебла. Початкова вологість стебел у ранній жовтій стиглості складала від 14,8% до 62,3%. Вологість визначали стандартним методом. Дослідження проводилися у 3–5 разовій повторюваності, результати обробляли математично-статистичним методом, похибка досліду становила 5%.



**Рис. 2** – Алгоритм процесу різання (подрібнення) стебла льону та розділення його на фракції



**Рис. 3** – Лабораторна установка для визначення зусилля різання стебел:

1 – упорна рама; 2 – захват; 3 – динамометр; 4 – фіксатор; 5 – ніж

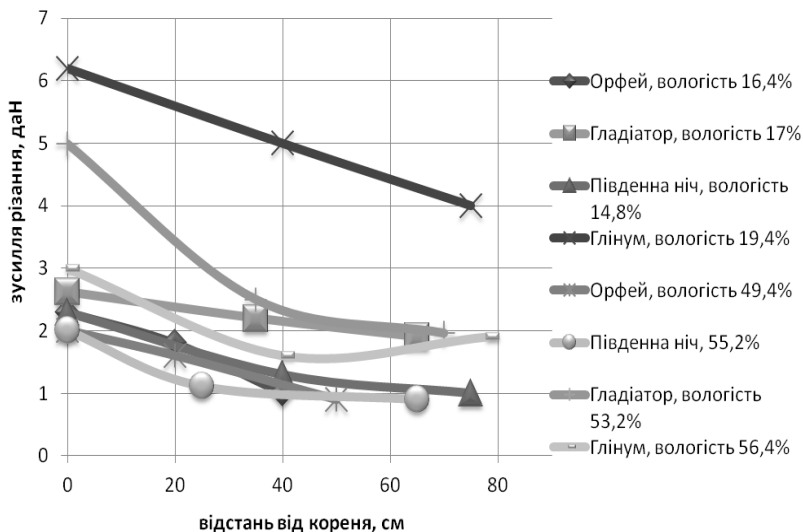
### Результати дослідження та обговорення

Отримання якісної сировини для виділення волокна зі стебел льону залежить від природно-кліматичних умов під час збирання, способу та умов отримання трести, кількості технічних засобів. У разі неможливості використання сировини для виготовлення волокна, біомасу стебел луб'яних культур доцільно переробляти для інших цілей із використанням процесу різання стебел. У результаті проведених досліджень отримані значення сили, що необхідна для різання одного, трьох та п'яти стебел залежно від біологічного виду та сорту льону, а також вологості і ділянки стебла (таблиця).

**Таблиця – Результати дослідження зусилля різання**

Вид	Сорт	Вологість, %	Довжина стебла, мм	Відстань від кореня, см	Зусилля різання, Н		
					1 стебло	3 стебла	5 стебел
Льон олійний	Орфей	16,4	45,0	0,0	2,30	3,30	5,20
				20,0	1,80	3,10	4,60
				40,0	1,00	1,60	4,10
	Південна ніч	14,8	80,0	0,0	2,30	3,50	7,50
				40,0	1,30	2,30	4,10
				75,0	1,00	2,10	3,90
	Айсберг	15,6	50,0	0,0	5,30	4,60	8,00
				25,0	2,00	2,80	4,80
				45,0	1,50	2,65	4,40
Льон-довгунець	Гладіатор	17,0	70,0	0,0	2,62	6,10	–
				35,0	2,20	5,90	–
				65,0	1,90	3,80	–
	Глі-нум	19,4	80,0	0,0	6,20	9,30	–
				40,0	5,00	7,00	–
				75,0	4,00	6,20	–
Льон олійний	Орфей	49,4	59,0	0,0	2,00	2,90	4,50
				20,0	1,60	2,70	4,00
				50,0	0,90	1,40	3,60
	Південна ніч	55,2	70,0	0,0	2,00	3,00	6,50
				25,0	1,11	2,00	3,60
				65,0	0,90	1,80	3,40
	Айсберг	62,3	55,0	0,0	4,60	4,00	7,00
				20,0	1,80	2,40	4,20
				45,0	1,30	2,30	3,80
Льон-довгунець	Гладіатор	53,2	75,0	0,0	4,99	6,70	3,70
				35,0	2,50	4,20	2,80
				70,0	1,96	2,80	2,70
	Глі-нум	56,4	85,0	0,0	3,00	4,60	9,00
				40,0	1,60	3,60	8,80
				78,0	1,90	3,00	5,00

За даними досліджень побудовані графічні залежності, що представлені на рис. 4.



**Рис. 4** – Залежності зусилля різання стебла льону олійного та льону-довгунця від місця різання

З отриманих залежностей видно, що для різання одиночного стебла на прикореневій ділянці потрібно прикласти найбільшу силу (6,2 Н) для льону-довгунця сорту Глінум вологістю 19,4%. Найменшу силу (2,3 Н) необхідно прикласти для різання на прикореневій ділянці одиночного стебла льону олійного сортів Південна ніч та Орфей з вологістю 55,2%. Необхідно відмітити, що сила різання для льону олійного та льону-довгунця відрізняється на 2–4 Н (для одиночних стебел). Така різниця у значеннях сили різання збільшується для групи із трьох стебел і більше. Максимальне зусилля різання (9,3 Н) спостерігалось для групи стебел льону-довгунця сорту Глінум з вологістю 19,4%, а мінімальне (0,9 Н) – для стебел льону олійного сорту Південна ніч з вологістю 55,2%.

### Висновки

На основі результатів проведених досліджень на стеблах льону можна зробити висновки, що під час подрібнення біомаси стебел олійних луб'яних культур потрібно урахувувати не тільки фазу стиглості, вид і сорт льону, а також вологість стебел. Експерименти показали, що опір різанню стебла льону олійного менший, ніж льону-

довгунця. Тобто стебла льону олійного краще піддаються переробленню у паливні брикети, ніж стебла льону-довгунця, за умови втрати ними придатності для перероблення на волокно. Тому для стебел льону-довгунця за умов, що описані у праці [8], та у відповідності до результатів проведених експериментів, доцільно рекомендувати перероблення у паливні рулони, як єдиний можливий варіант збереження урожаю за умови втрати можливості перероблення його на волокно.

Проведені дослідження дозволяють встановити потенціал стеблової частини урожаю олійних луб'яних культур як сировини для отримання короткого неорієнтованого волокна, виготовлення паливних і інших матеріалів. Це дозволяє усунути втрати стеблової складової урожаю луб'яних культур, покращити фінансові показники вирощування цих культур, вирішити екологічні проблеми утилізації залишків сільськогосподарських культур після збирання урожаю. Крім того, результати досліджень дозволяють встановити послідовності технологічних операцій на етапах збирання та первинного перероблення луб'яних культур.

#### Список посилань

1. Ягелюк, С.В. (2016). Формування властивостей льняних матеріалів: монографія. Луцький НТУ, Луцьк, 128.
2. Байдакова, Л.І., Ягелюк, С.В., Байдакова, І.М. (2014). Експертиза товарів: підручник. Видавничий Дім "Слово", Київ, 380.
3. Ягелюк, С.В., Дідух, В.Ф. (2020). Напрямки використання продукції переробки льону олійного та льону-довгунця. Товарознавчий вісник, 13, 292–305.
4. Mańkowski, J., Maksymiuk, W., Szychalski, G., Kołodziej, J., Kubacki, A., Kupka, D., Pudelko, K. (2018). Research on new technology of fiber flax harvesting. *Journal of Natural Fibers*, 1, 53–61.
5. Nilsson, D., Karlsson, S. (2005). A model for the field drying and wetting processes of cut flax straw. *Biosystems Engineering*, 92, 25–35.
6. Morrison, W.H., Archibald, D.D., Sharma, H.S.S., Akin, D.E. (2000). Chemical and physical characterization of water- and dew-retted flax fibers. *Industrial Crops and Products*, 12, 39–46.
7. Горач, О.О. (2009). Удосконалення технології одержання трести з соломи льону олійного з використанням штучного зволоження [Дисертація канд. техн. наук]. Херсонський національний технічний університет, Херсон, 206.
8. Ягелюк, С.В., Дідух, В.Ф. (2020) Концептуальна модель технологій переробки стебел льону. *Сільськогосподарські машини*, 44, 155–164.
9. Yaheliuk, S., Didukh, V., Boyko, G. (2020). The improved technology of biomass processing to obtain products of various applications. *Сільськогосподарські машини*, 45, 151–157.



10. Yaheliuk, S., Didukh, V., Tom'uk, V. (2019). Justification of the new technology of processing residues of flax stem mass in Western Polissya. *Teka. A Quarterly Journal of Agri Food Industry*, 9(1), 5–12.
11. Дідух, В.Ф., Онюх, Ю.М., Дуць, І.З. (2018). Дослідження процесу подрібнення стебел льону олійного. *Сільськогосподарські машини*, 39, 34–42.
12. Шеїна, А.В., Заплетніков, І.М., Гордієнко, О.В. (2014). Експериментальні дослідження процесу різання рослинних матеріалів. *Актуальные вопросы современной науки*, 33, 52–61.
13. Головенко, Т.М., Бойко, Г.А., Іваненко, О.О., Шовкомуд, О.В. (2016). Загальна характеристика показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів. *Молодий вчений*, 5(32), 218–222.
14. Chute, W., Henry, D., Rolheiser, D. (2010). Decortication process. Patent № US 7.669.292 B2, USA.
15. Munder, F. et al. (2004). Results of an advanced technology for decortication of hemp, flax and linseed. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 418, 165–179.

**Інформація для авторів та читачів**

*Усі статті, що публікуються у збірнику, проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів (подвійне сліпе рецензування).*

*Унікальність текстів публікації перевіряється за допомогою системи пошуку ознак плагіату Unicheck.*

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей у статті відповідальність несе автор (автори).*

*Авторські права: за авторами зберігаються усі авторські права та права на видання без обмежень.*

*Збірник дозволяє користувачам: читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати та посилатися на повні тексти статей за умови зазначення авторства.*

\*\*\*

**Information for authors and readers**

*All the articles that are published in the journal must be peer reviewed. It is conducted anonymous both for authors and reviewers (double blind peer review).*

*The uniqueness of the texts of publications is checked with using the Unicheck plagiarism signs search system.*

*The authors take responsibilities for the reliability of stated facts, quotations and others statements 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.*



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

Випуск 46

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ  
“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 OF SCIENTIFIC ARTICLES  
“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. Дударєв  
Комп’ютерна верстка: О.М. Гапонюк

Підписано до друку 28.05.2021 р., формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 8,38. Наклад 100.

Друк ПП Іванюк В.П.  
43021 м. Луцьк, вул. Винниченка, 65  
Свідоцтво Держкомінформу України ВЛН № 31 від 04.02.2004 р.

Реєстраційне свідоцтво  
Міністерство юстиції України КВ № 15902-4374 ПР