

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

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

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

**ABSTRACT**

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

Key words:

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

Article history:

Received 27.04.2023

Accepted 01.06.2023

***Corresponding author:**

kobzar_volun@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1016

To cite this article:

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

УДК 677.11.08

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

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

Ключові слова:

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

Історія публікації:

Отримано 27.04.2023

Затверджено 01.06.2023

***Автор для листування:**

kobzar_volun@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1016

Цитувати цю статтю:

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

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

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

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

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

- пряме комбайнування зернозбиральним комбайном;

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

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

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

комбайнування під час збирання льону олійного.

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

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

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

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

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

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

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

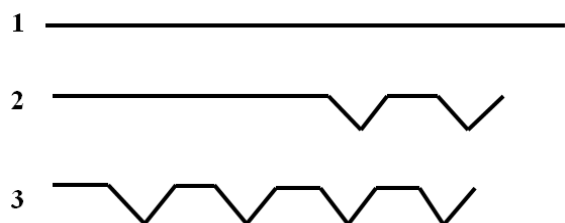


Рис. 1 – Схематичне зображення взаємодії трапецієподібного зубця з стеблом льону: 1 – стебло льону олійного до взаємодії з зубцями вальця; 2 – стебло льону після контакту з двома ребрами першого зубця; 3 – стебло льону після контакту з чотирма ребрами двох сусідніх зубців

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

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

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

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

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

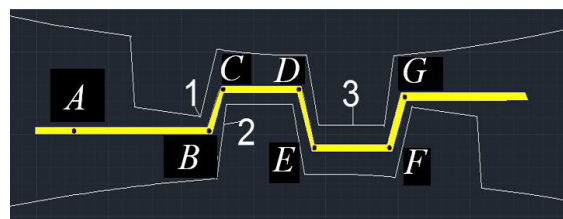


Рис. 2 – Розміщення стебла льону між виступами і западинами пари вальців із трапецієподібними зубцями

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

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

де $A_6 = P(h + \Delta_0)$; Δ_0 – динамічне переміщення пружної системи.

Потенціальна енергія деформації:

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

де P_0 – сила удару по стеблу льону, Н.

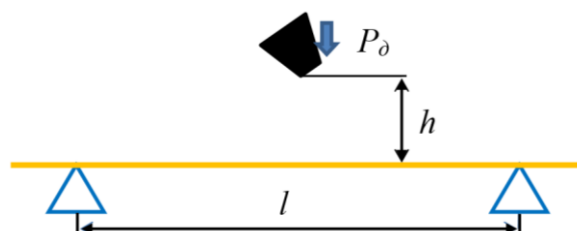


Рис. 3 – Схема до розрахунку руйнування стебел льону олійного

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

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

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

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

Коефіцієнт динамічності визначається за виразом:

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

Статичне напруження визначається за виразом:

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

де d – діаметр стебла льону, м.

Максимальне динамічне напруження визначається за виразом:

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

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

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

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

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

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



а



б

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

а – підготовлення стебел льону до експерименту;

б – стебла в робочій зоні моделі трапецієподібного зубця



а



б

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

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

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

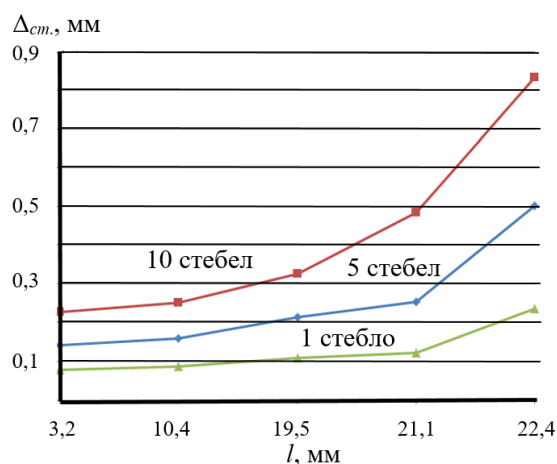


Рис. 6 – Залежність статичного переміщення $\Delta_{ст.}$ від l та кількості стебел льону олійного

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

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

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

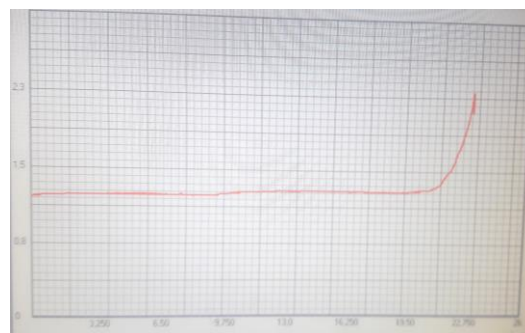


Рис. 7 – Результати визначення ударного зусилля $P_{уд}$.

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

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

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

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

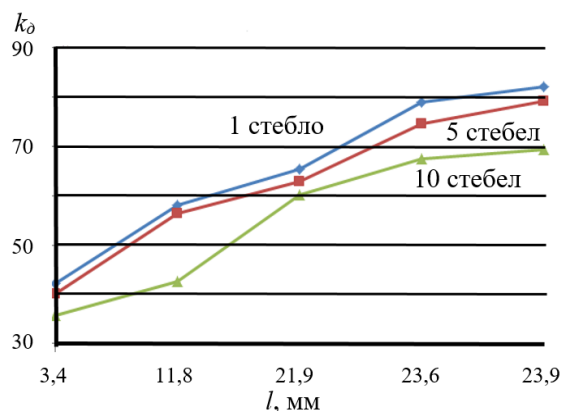


Рис. 8 – Графіки зміни динамічного коефіцієнта з урахуванням прогинання та кількості стебел льону олійного

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

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

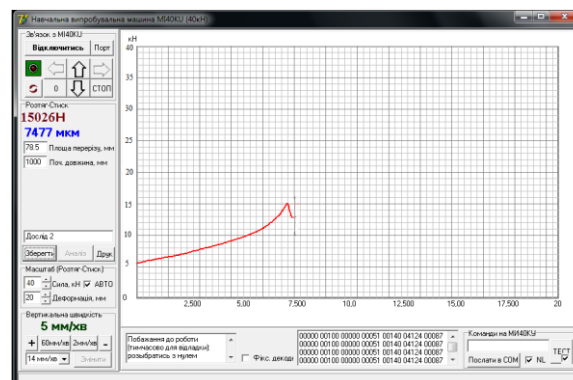


Рис. 9 – Визначення значення розривного зусилля $P_{роз}$.

ВИСНОВКИ

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

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

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

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