

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 67.017

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/27>

Євтушенко А.В.

<https://orcid.org/0000-0002-7103-9186>

Херсонський національний технічний університет

Бойко Г.А.

<https://orcid.org/0000-0001-8773-5525>

Херсонський національний технічний університет

Зілінський А.І.

<https://orcid.org/0000-0003-4258-7738>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ВІДОКРЕМЛЮВАНІСТЬ ЛУБ'ЯНОГО ВОЛОКНА ЗІ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

У статті досліджено вплив параметрів ультразвукової кавітаційної обробки на процес відокремлення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності первинної переробки луб'яних культур та пошуку енергоефективних і екологічно безпечних технологій виділення волокна. Морфологічна будова стебел льону олійного характеризується складною структурою, у якій волокнисті пучки з'єднані з деревинною частиною пектиновими, геміцелюлозними та лігніновими сполуками. Саме руйнування цих міжклітинних зв'язків визначає ефективність процесу відокремлення волокна. Перспективним способом інтенсифікації цього процесу є застосування ультразвукової кавітації, яка створює локальні гідродинамічні удари та мікрострумені, що сприяють руйнуванню міжклітинної матриці без значного пошкодження волокон.

Метою дослідження є визначення впливу температури середовища, потужності ультразвукового випромінювання та тривалості обробки на відокремлюваність луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Для проведення експерименту стебла льону олійного нарізали на відрізки довжиною 40 мм, що відповідало розмірам робочої камери трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань. Отримані зразки було розподілено на верхівкову, серединну та прикореневу частини. Після ультразвукової обробки зразки висушували до вологості 16–20 %, після чого визначали відокремлюваність луб'яного волокна від деревинної частини стебла.

Дослідження проводили з варіюванням тривалості обробки (1,5–7,5 хв), температури середовища (30–70 °С) та потужності ультразвукового впливу (200–500 Вт). Встановлено, що найвища відокремлюваність волокон досягається за температури близько 60 °С та потужності 450 Вт. Оптимальна тривалість обробки залежить від частини стебла: для верхівкової – 3 хв., для серединної – 6 хв., для прикореневої – 7,5 хв. Отримані результати підтверджують перспективність використання ультразвукової кавітаційної обробки для підвищення ефективності виділення луб'яного волокна зі стебел льону олійного.

Ключові слова: льон олійний, солома, первинна переробка, ультразвуковий кавітатор, відокремлюваність.



Постановка проблеми. Ефективність первинної переробки луб'яних культур, зокрема льону олійного, значною мірою залежить від здатності руйнувати міжклітинні зв'язки між волокнистими пучками та деревинною частиною стебла. Традиційні методи виділення луб'яного волокна часто характеризуються значною тривалістю процесу, високими енерговитратами та нерівномірністю руйнування структурних зв'язків у стеблі. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних рішень, здатних забезпечити інтенсифікацію процесу виділення волокна при збереженні його фізико-механічних властивостей.

Перспективним напрямом є використання ультразвукової кавітації, яка дозволяє ефективно руйнувати пектиново-геміцелюлозні зв'язки між волокном і деревинною частиною стебла. Зокрема, застосування трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань забезпечує формування симетричного кавітаційного поля та рівномірний вплив на сировину [1]. Проте вплив основних параметрів ультразвукової обробки на процес відокремлення волокна для різних частин стебла льону олійного потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення ефективності первинної переробки льону олійного та покращення відокремлюваності луб'яного волокна від деревинної частини стебла є предметом досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. У наукових роботах зазначається, що процес виділення волокна значною мірою залежить від ступеня руйнування пектинових і геміцелюлозних зв'язків, які утримують волокнисті пучки у структурі стебла [2, 3].

У вітчизняних дослідженнях значну увагу приділено традиційним способам первинної переробки льону – польовому вилежуванню, водному вимочуванню та механічній обробці стебел. Встановлено, що ефективність відокремлення волокна значною мірою залежить від ступеня розкладання пектинових речовин у процесі формування трести. При цьому не долежування або перележування стебел негативно впливає на якість волокна та ускладнює його подальшу переробку [4, 5].

Зарубіжні дослідження також підтверджують, що метод первинної обробки стебел істотно впливає на структуру та фізико-механічні властивості волокон. Значна частина робіт присвячена дослідженню процесу реттингу (retting), під час якого відбувається мікробіологічне або хімічне руйнування міжклітинних зв'язків, що сприяє відокремленню волокон від деревинної частини стебла [6].

Останніми роками все більшої уваги набувають фізичні методи інтенсифікації процесу виділення волокна, зокрема використання ультразвукової обробки. Дослідження показують, що ультразвукова кавітація сприяє руйнуванню клітинної структури рослинної сировини та прискорює процес деструкції міжклітинних зв'язків, що покращує відокремлюваність волокон і скорочує тривалість технологічного процесу [7, 8].

Отже, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що удосконалення технологій первинної переробки льону олійного та застосування фізичних методів інтенсифікації процесу руйнування міжклітинних зв'язків є перспективним напрямом підвищення ефективності виділення луб'яного волокна.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення впливу параметрів ультразвукової кавітаційної обробки (температури середовища, потужності ультразвукового випромінювання та тривалості обробки) на відокремлюваність луб'яного волокна зі стебел льону олійного для різних морфологічних частин стебла та встановлення оптимальних режимів обробки.

Виклад основного матеріалу. Аналіз морфологічної будови стебел льону олійного, а також існуючих методів виділення луб'яного волокна показав, що ефективність первинної переробки значною мірою залежить від ступеню руйнування міжклітинних зв'язків між волокнистими пучками та деревинною частиною стебла.

Результати попередніх досліджень засвідчили перспективність використання трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань [1]. Його конструкція забезпечує формування симетричного кавітаційного поля навколо осі вібратора, що дозволяє рівномірно впливати на стебла льону з усіх боків. Поєднання кавітаційного ефекту, механічних радіальних коливань і локальних гідродинамічних ударів сприяє ефективному руйнуванню пектиново-геміцелюлозних зв'язків між волокном і деревинною, водночас зберігаючи цілісність волоконної структури.

Подальше вивчення процесів руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного під дією ультразвукової кавітації, зокрема із застосуванням трубчастого кавітатора з радіальною модою коливань було спрямовано на дослідження ефективності виділення луб'яного волокна.

З цією метою визначали відокремлюваність луб'яного волокна льону олійного від деревинної частини стебла, що є одним із ключових показників якості трести. Для цього солону льону олійного

перед проведенням експериментальних досліджень підготували до обробки на трубчастому ультразвуковому кавітаторі з радіальною модою коливань. Підготовка зразків здійснювалася шляхом нарізання стебел на відрізки довжиною 40 мм, що відповідало конструктивним розмірам робочої камери кавітатора. Нарізання проводили за допомогою різача гільйотинного типу, який забезпечує рівномірність та чистоту зрізу, а також мінімізує механічні пошкодження волоконної структури стебел. Використання такого обладнання дозволило отримати зразки з однаковими геометричними параметрами, що є важливою умовою для забезпечення відтворюваності та коректності експериментальних досліджень.

З метою врахування морфологічних особливостей стебла льону олійного та їх можливого впливу на процес відокремлення волокна отримані відрізки було розподілено на три групи: верхівкову, серединну та прикореневу частини стебла. Такий поділ дозволив провести більш детальний аналіз ефективності обробки та оцінити відмінності у процесі руйнування міжклітинних зв'язків у різних зонах стебла.

Після ультразвукової обробки зразки соломи льону олійного піддавали сушінню у сушильній шафі з метою доведення вологості матеріалу до рівня, необхідного для визначення відокремлюваності волокна. Відомо, що для проведення такого визначення оптимальна вологість зразків повинна становити 16–20 % [9]. Сушіння проводили до досягнення зазначеного діапазону вологості, що забезпечувало коректність подальших вимірювань.

Після стабілізації вологості проводили визначення відокремлюваності луб'яного волокна від деревинної частини стебла. Оцінювання здійснювали за методикою, що передбачає механічну обробку підготовлених відрізків та подальший підрахунок ступеня відокремлення волокон [9]. Отримані результати використовували для оцінювання ефективності ультразвукової кавітаційної обробки та її впливу на процес руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного.

Випробування проводили із варіюванням основних технологічних параметрів процесу ультразвукової кавітації – температури робочого середовища, тривалості обробки та потужності ультразвукового впливу. Такий підхід дозволив оцінити вплив кожного з параметрів на ефективність руйнування міжклітинних зв'язків і, відповідно, на ступінь відокремлюваності луб'яного волокна.

З огляду на те, що стебло льону олійного характеризується неоднорідною морфологічною будовою по довжині, дослідження проводили послідовно для різних його частин. На першому етапі експериментів ультразвуковій кавітаційній обробці піддавали верхівкову частину соломи стебел льону олійного, яка відрізняється меншою щільністю тканин і, як правило, має інші умови зчеплення волокна з деревинною частиною. Це дало можливість оцінити початкові закономірності впливу ультразвукової кавітації на процес відокремлення волокна та визначити характер зміни досліджуваного показника залежно від параметрів обробки (рис. 1).

Найкращий режим ультразвукової кавітаційної обробки верхівкової частини стебел льону олійного – 3хв. при температурі 60 °С та потужності 450 Вт, що забезпечило відокремлюваність волокна на рівні 4,7. Саме така комбінація параметрів створює оптимальний баланс між інтенсивністю кавітаційних процесів і збереженням структури волокна: ультразвукові хвилі ефективно руйнують пектинові зв'язки, але не пошкоджують клітинні стінки. Короткі режими тривалістю 1,5 хв. незалежно від потужності та температури дають лише часткове відокремлення волокна (2,0–3,5 одиниць), оскільки час дії недостатній для повного руйнування міжклітинних зв'язків.

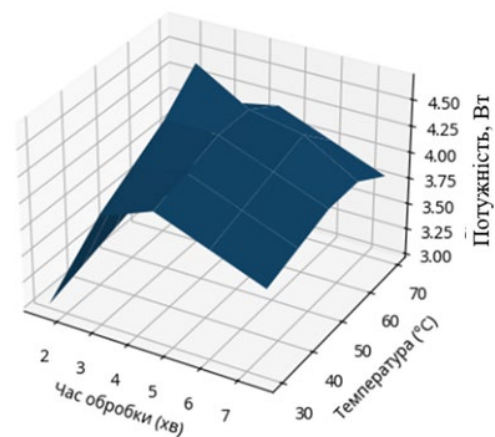


Рис. 1. Залежність відокремлюваності волокон верхівкової частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Середні режими тривалістю 4,5 хв. при потужності 250–450 Вт за температури 40–60 °С забезпечують стабільно високі результати (3,5–4,4 одиниці), проте не перевищують оптимальний режим, адже надмірне збільшення часу починає знижувати якість через часткове пошкодження волокна. Довгі режими тривалістю 6–7,5 хв. при потужності 350–500 Вт і температурі 50–70 °С демон-

струють зниження ефективності (3,0–4,0 одиниць), що пояснюється надмірним руйнуванням структури волокна: воно стає ламким і втрачає міцність. Потужність понад 450 Вт при високих температурах не покращує результат, а навпаки призводить до надмірної кавітації, яка руйнує клітинні стінки і знижує якість відокремлення. Таким чином, оптимальним для технологічної обробки верхівкової частини соломи стебел льону олійного є режим середньої тривалості, середньовисокої потужності та помірно високої температури, що забезпечує максимальну ефективність без пошкодження структури волокна.

Аналогічні дослідження проводили для середньої (рис. 2) та прикореневої частин стебел (рис. 3) з метою порівняння отриманих результатів і встановлення залежності відокремлюваності волокон від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки.

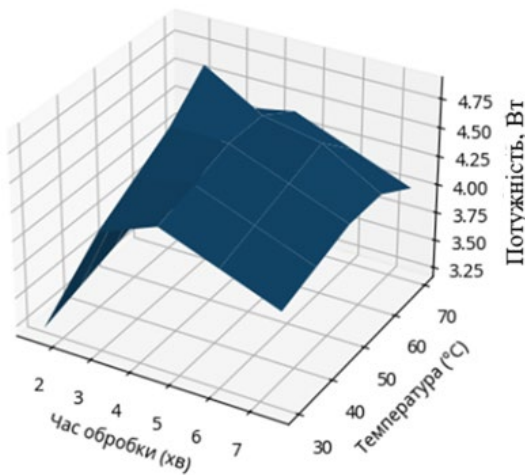


Рис. 2. Залежність відокремлюваності волокон середньої частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Результати досліджень, які наведено на рис. 2 свідчать, що при збільшенні часу від 1,5 до 6 хв. відокремлюваність волокон поступово зростала. Максимальне значення показника – 4,8 – було отримано за потужності 450 Вт, при температурі 60 °С та тривалості обробки 6 хв., що свідчить про найбільш ефективне руйнування міжклітинних зв'язків у цих режимах.

Подальше збільшення тривалості обробки до 7,5 хв. не приводило до покращення результатів, а в окремих випадках супроводжувалося незначним зниженням відокремлюваності, що може бути пов'язано з частковим пошкодженням або ущільненням структури волокон під дією надмірної ультразвукової енергії.

Отже, для середньої частини стебел льону олійного найбільш ефективними параметрами ультразвукової кавітаційної обробки є температура близько 60 °С, потужність 450 Вт та тривалість обробки близько 6 хв.

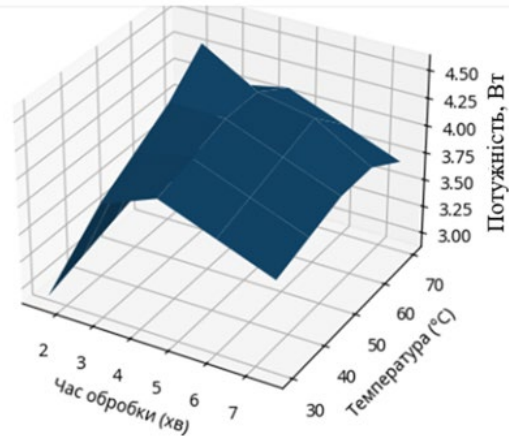


Рис. 3. Залежність відокремлюваності волокон прикореневої частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Результати визначення відокремлюваності луб'яного волокна для прикореневої частини стебла льону олійного показали залежність цього показника від тривалості ультразвукової обробки, потужності випромінювання та температури робочого середовища (рис. 3).

Встановлено, що із збільшенням часу ультразвукової дії від 1,5 до 7,5 хв. відокремлюваність волокон зростає, що свідчить про поступове послаблення міжклітинних зв'язків у структурі стебла. Максимальне значення показника – 4,7 – отримано за умов потужності 450 Вт, температури 60 °С та тривалості обробки 7,5 хв.

Отже, для прикореневої частини стебел льону олійного найбільш ефективними умовами ультразвукової кавітаційної обробки є температура близько 60 °С, потужність 450 Вт та тривалість обробки 7,5 хв., за яких забезпечується найбільший ступінь відокремлення луб'яного волокна від деревинної частини стебла.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність застосування трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань для інтенсифікації процесу відокремлення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Встановлено, що ступінь відокремлюваності волокон залежить від тривалості обробки, температури середовища та потужності ультразвукового впливу.

Експериментально встановлено, що найбільш ефективною є температура близько 60 °С та потужність 450 Вт, за яких забезпечується інтенсивне руйнування пектинових міжклітинних зв'язків без

пошкодження структури волокна. Оптимальна тривалість обробки залежить від морфологічної частини стебла: для верхівкової частини – близько 3 хв., для середньої частини – 6 хв., а для прикореневої частини – 7,5 хв. Збільшення часу обробки понад оптимальні значення не покращує результатів і може призводити до часткового пошкодження волокон.

Отримані результати свідчать, що використання ультразвукової кавітаційної обробки дозволяє підвищити ефективність руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного, покращити відокремлюваність луб'яного волокна та може бути перспективним напрямом удосконалення технологій первинної переробки луб'яних культур.

Список літератури:

1. Євтушенко А., Луговський О. Ультразвукова кавітаційна обробка стебел льону олійного з метою вилучення технічних конопель. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 359, №6.1. С. 173–178. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-24>
2. The pectin content as a measure of the retting and rettability of flax / W.J. M. Meijer et al. *Industrial Crops and Products*. 1995. Vol. 4, no. 4. P. 273–284. URL: [https://doi.org/10.1016/0926-6690\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0926-6690(95)00041-0)
3. Akin D.E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *ISRN Biotechnology*. 2013. Vol. 2013. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
4. Голобородько П. А., Саленко О. Ф., Слободяник М. С. Льон і коноплі: технологія вирощування та переробки. Київ: Урожай, 2011. 368 с.
5. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф. Напрямки використання продукції переробки льону олійного та льону довгунця. *Товарознавчий вісник*. 2020. Т. 1, №13. С.292–305. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25>
6. Development of a smart farming tool to monitor the degree of dew retting of flax stems / A. Reda et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no.1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12801-1>
7. Євтушенко А. В., Бойко Г. А. Сучасний стан первинної переробки луб'яних культур. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 1, №1(92). С. 316–320. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.43>
8. Bussemaker M. J., Zhang D. Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, no.10. P. 3563–3580. URL: <https://doi.org/10.1021/ie3022785>
9. ТУ У 01.1-05480298-001:2017. Треста льону олійного. Технічні умови. Чинний від 2018-08-28. Вид. офіц. Херсон, 2018. 42 с.

Yevtushenko A.V., Boiko H.A. Zilinsky A.I. INFLUENCE OF ULTRASOUND CAVITATION TREATMENT PARAMETERS ON THE SEPARATION OF FLAX FIBER FROM OIL FLAX STEM

The article investigates the influence of ultrasonic cavitation treatment parameters on the process of bast fiber separation from oil flax stems. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of primary processing of bast crops and the search for energy-efficient and environmentally friendly technologies for fiber separation. The morphological structure of oil flax stems is characterized by a complex structure in which fibrous bundles are connected to the woody part by pectin, hemicellulose and lignin compounds. It is the destruction of these intercellular bonds that determines the efficiency of the fiber separation process. A promising way to intensify this process is the use of ultrasonic cavitation, which creates local hydrodynamic shocks and microjets that contribute to the destruction of the intercellular matrix without significant damage to the fibers. The purpose of the study is to determine the influence of the temperature of the environment, the power of ultrasonic radiation and the duration of treatment on the separability of bast fiber from oil flax stems. To conduct the experiment, the stems of oil flax were cut into 40 mm long segments, which corresponded to the dimensions of the working chamber of a tubular ultrasonic cavitator with a radial oscillation mode. The obtained samples were divided into the apical, middle and basal parts. After ultrasonic treatment, the samples were dried to a moisture content of 16–20%, after which the separability of bast fibers from the woody part of the stem was determined.

The study was conducted with varying treatment duration (1.5–7.5 min.), ambient temperature (30–70 °C) and ultrasonic power (200–500 W). It was found that the highest separation of fibers is achieved at a temperature of about 60 °C and a power of 450 W. The optimal treatment duration depends on the part of the stem: for the apical part - 3 min., for the middle part - 6 min., for the basal part - 7.5 min. The results obtained confirm the prospects of using ultrasonic cavitation treatment to increase the efficiency of bast fiber extraction from oil flax stems.

Keywords: oil flax, straw, primary processing, ultrasonic cavitator, separability.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026