

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-24>
УДК 647.23

ЄВТУШЕНКО АРТЕМ

Херсонський національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-7103-9186>
e-mail: tcc@kntu.edu.ua

ОЛЕКСАНДР ЛУГОВСЬКИЙ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0003-1076-7718>
e-mail: atoll-sonic@ukr.net

УЛЬТРАЗВУКОВА КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО З МЕТОЮ ВИЛУЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВОЛОКОН

В роботі розглядаються проблеми ефективного вилучення луб'яного волокна зі стебел льону олійного з мінімальними енергозатратами та збереженням структури волокна. Окреслено недоліки традиційних методів обробки (біологічних, хімічних, термомеханічних), які є ресурсомісткими та екологічно ризикованими. Запропоновано впровадження ультразвукової кавітації як перспективного методу попередньої обробки, що забезпечує руйнування міжклітинних пектинових, геміцелюлозних і лігнінових зв'язків без застосування хімічних реагентів.

Ключові слова: льон олійний, первинна переробка, ультразвук, кавітація.

YEVTUSHENKO ARTEM

Kherson National Technical University

LUHOVSKYI OLEKSANDR

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ULTRASONIC CAVITATION TREATMENT OF OIL FLAX STALKS FOR THE PURPOSE OF REMOVING TECHNICAL FIBERS

The paper considers the problems of effective extraction of bast fiber from oil flax stems with minimal energy consumption and preservation of fiber structure. The shortcomings of traditional processing methods (biological, chemical, thermomechanical), which are resource-intensive and environmentally risky, are outlined. The introduction of ultrasonic cavitation as a promising method of pre-treatment is proposed, which ensures the destruction of intercellular pectin, hemicellulose, and lignin bonds without the use of chemical reagents.

An analysis of various types of ultrasonic systems—local probe, axial, and surface bath—was carried out, revealing their design limitations and uneven impact. The most effective is a tubular ultrasonic cavitator with a radial mode of oscillation, which creates a symmetrical cavitation field and evenly covers the raw material from all sides. Due to its design features (knife-like transformer sections, length less than half a wavelength), it ensures stable vibrations and uniform processing even of stems with varying diameters.

The system, powered by a powerful generator with feedback, operates in automatic frequency tuning and power stabilization mode, which allows you to obtain clean fiber without loss of strength. Analysis of the principle of operation of a tubular ultrasonic cavitator with radial mode vibrations confirms its suitability for the effective extraction of bast fiber from oil flax stems. It is recommended that further experimental studies using this installation be directed toward optimizing the operating parameters—frequency, oscillation amplitude, treatment duration, and temperature regime—in order to achieve maximum fiber yield while maintaining its strength and purity.

Keywords: oil flax, primary processing, ultrasound, cavitation.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу України та підвищення вимог до ефективності використання технічних культур, у тому числі й в харчовій промисловості, особливої актуальності набуває питання глибокої переробки луб'яної сировини, зокрема стебел льону олійного. Одним із ключових етапів у ланцюгу первинної обробки є виділення луб'яного волокна, що становить значну частину біомаси стебел і має цінні текстильні, технічні й біополімерні властивості.

Традиційні методи вилучення волокна (вимочування, хімічна обробка, механічне тріпання) є енерго- та ресурсомісткими, мають тривалий цикл, нерівномірну якість волокна, а також спричиняють значний вплив на довкілля. Це суперечить сучасним вимогам до ресурсозберігаючих, екологічно безпечних і безперервних технологій.

Проблема полягає в пошуку ефективного методу деструкції міжклітинних зв'язків у стебловій частині льону без пошкодження структури волокна, з мінімальними затратами енергії, часу та без використання хімічних реагентів. У цьому контексті перспективним є застосування ультразвукової кавітаційної дії, що забезпечує інтенсивний фізичний вплив на мікроструктуру стебел у рідкому середовищі, з можливістю точного керування режимами обробки.

Особливий науковий інтерес становить вивчення ефективності ультразвукової дії у формі радіальної кавітації, реалізованої за допомогою спеціалізованого трубчастого кавітатора, здатного створювати стабільне кавітаційне поле по всьому периметру оброблюваного середовища. Така конструкція потребує теоретичного

обґрунтування її доцільності, а також практичного аналізу умов, що забезпечують максимальну ефективність виділення волокна при мінімальному впливі на інші компоненти сировини.

Таким чином, розв'язання даної проблеми сприятиме розробці нових технологій переробки льону, підвищенню конкурентоспроможності луб'яної продукції, зниженню витрат і забезпеченню сталого виробництва.

Аналіз досліджень та публікацій

Протягом останніх двох десятиліть ультразвукова обробка послідовно привертає увагу у багатьох галузях промисловості завдяки своїй здатності модифікувати матеріали та формувати їх мікроструктуру, поєднує простоту реалізації із енергоощадністю та мінімальним впливом на навколишнє середовище, що робить її особливо перспективною для широкого застосування — зокрема, в харчових технологіях [1 - 3].

На сьогодні ця технологія активно використовується для вирішення низки технічних задач, таких як підвищення врожайності та ефективності виробничих процесів, суттєве скорочення тривалості обробки, екстрагування компонентів із застосуванням нетоксичних розчинників, а також зменшення енергоспоживання в технологічних ланцюгах [4 - 6]. Завдяки своїй адаптивності та екологічній перевазі ультразвукова обробка має потужний потенціал для подальшого впровадження в різних інноваційних секторах [7].

Останні дослідження свідчать про ефективність застосування фізичних методів, зокрема ультразвукової обробки, для інтенсифікації процесів розкладу пектинових речовин, які зв'язують волокна зі стебловими тканинами [8].

Ультразвук спричиняє хімічні та фізичні ефекти, які, як було виявлено, посилюють попередню обробку лігноцелюлози шляхом делігніфікації та поверхневої ерозії [9, 10].

Дослідження, проведені з льоном-довгунцем, коноплею та іншими технічними культурами, показали позитивні результати [11, 12], однак у науковій літературі відсутні системні дані щодо застосування ультразвукової кавітації саме до льону олійного, який має відмінну морфологію стебел та хімічний склад.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування використання технології ультразвукової кавітаційної обробки стебел льону олійного з метою ефективного руйнування структурних зв'язків та вилучення волокна, придатного для подальшого використання в різних галузях промисловості, у тому числі й харчовій.

Виклад основного матеріалу

Однією з ключових проблем у галузі первинної переробки луб'яних культур, зокрема льону олійного (*Linum usitatissimum* L.), є ефективне виділення волокна зі стеблової сировини при мінімальних енергозатратах і збереженні структури волокон. Стебла цієї культури мають складну морфологічну структуру - волокнисті пучки розміщені в периферійній частині стебла й оточені деревинною тканиною. Ці компоненти зв'язані пектиновими, геміцелюлозними та частково лігніновими сполуками, які утворюють складну міжклітинну матрицю [13, 14].

Традиційні методи вилучення луб'яного волокна — біологічне вимочування, хімічна або термомеханічна обробка — характеризуються високим ресурсоспоживанням, тривалістю процесу та екологічними ризиками [8].

Одним із перспективних напрямів удосконалення технології виділення технічного волокна зі стебел луб'яних культур є впровадження інноваційних методів попередньої обробки сировини. Особливої уваги заслуговує застосування ультразвукової кавітації, яка інтенсифікує процеси руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах, забезпечуючи вивільнення луб'яного волокна без використання хімічних реагентів. Ультразвук у рідкому середовищі створює кавітаційні ефекти — мікрровибухи бульбашок, мікродструмені та локальне підвищення температури і тиску — що призводять до фізичного руйнування пектинових зв'язків між волокнами та деревиною [11, 12].

Для реалізації процесу ефективного руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного з метою вивільнення луб'яного волокна було проаналізовано кілька типів ультразвукової обробки, що мають різну конструктивну та функціональну специфіку.

Зокрема, локальна зондова кавітація передбачає генерацію та поширення поздовжніх ультразвукових хвиль уздовж осі робочої камери або реактора, у якому перебуває оброблювана сировина. Джерелом ультразвуку у цьому випадку зазвичай є один або декілька сонотродів, розташованих по краях камери. У процесі передачі енергії ультразвукові хвилі спрямовано проходять через середовище, спричиняючи періодичні зміни тиску, що формують зони розрідження та стиснення. Це створює умови для локалізованого утворення кавітаційних бульбашок, які колапсують поблизу поверхні об'єктів у потоці. (активне ультразвукове джерело типу сонотрода, що створює сильну кавітацію в обмеженій зоні [15], що дозволяє реалізувати направлений вплив на сировину, однак має низку обмежень. Основною проблемою є нерівномірність інтенсивності кавітаційного поля: максимальний вплив спостерігається в безпосередній близькості до сонотродів, тоді як віддалені ділянки середовища отримують значно слабший вплив. Це ускладнює забезпечення однакової якості обробки по всьому об'єму, особливо в умовах великих камер або безперервних потоків сировини. Крім того, наявність відбитих хвиль і інтерференційних ефектів може призводити до утворення стоячих хвиль, які, у свою чергу, викликають неоднорідні зони активності, що знижує контрольованість і повторюваність процесу.

Осьова (лінійна) ультразвукова дія — це метод, при якому поздовжні акустичні хвилі поширюються вздовж осі камери обробки. Джерело ультразвуку (сонотрод або п'єзо привід) зазвичай розміщене на торці реактора, передаючи енергію уздовж сировини. Такі коливання створюють зони стиску і розрідження, що викликає кавітацію — утворення і колапс бульбашок, які руйнують міжклітинні зв'язки у стеблах льону [16].

Серед переваг методу є його конструктивна простота, сумісність із поточковими технологіями, використання стандартного обладнання. Проте, головним недоліком є нерівномірність кавітаційного впливу: енергія концентрується поблизу джерела, а в глибині середовища ефективність різко знижується. Також можуть виникати стоячі хвилі, що створюють зони надлишкового або недостатнього впливу. Отже, осьова дія не забезпечує стабільної та рівномірної обробки структурно складної сировини.

Поверхнева ультразвукова ванна — це пристрій, у якому ультразвукові хвилі передаються через рідину, що частково охоплює сировину. П'єзоелектричні перетворювачі, розташовані на дні або стінках ванни, генерують коливання, які створюють кавітаційні ефекти та мікро струмені. Ці явища діють на поверхню стебел льону олійного, сприяючи делікатному руйнуванню міжклітинних зв'язків і полегшуючи вилучення волокна [17].

Серед переваг такого методу — щадна дія на структуру волокна, рівномірне охоплення доступної поверхні, можливість додавання ферментів або хімічних реагентів у рідину, а також простота конструкції, що дозволяє легко інтегрувати ванну в лабораторні або виробничі умови. Водночас метод має і певні обмеження: ультразвукові хвилі діють переважно на поверхню, що ускладнює обробку щільних або товстих стебел; при складній геометрії сировини можливе нерівномірне проникнення енергії; частина енергії розсіюється в рідині, знижуючи ефективність; а масштабування процесу потребує додаткових технічних рішень.

Враховуючи обмежену глибину проникнення ультразвукових хвиль у поверхневій ванні, значні втрати енергії в рідкому середовищі та нерівномірність обробки при складній формі стебел, використання такого методу для обробки льону олійного є малоефективним. Щільна структура стебел потребує більш інтенсивного та локалізованого впливу, який поверхнева ванна не забезпечує. Тому її застосування для вилучення волокна з льону олійного є недоцільним і потребує заміни на більш ефективні технології.

Натомість, трубчастий кавітатор з радіальною модою коливань створює симетричне кавітаційне поле навколо своєї осі, яке охоплює сировину з усіх боків. Такий формат найбільш ефективний для об'ємної, циліндричної або нерівномірної сировини, оскільки забезпечує рівномірне руйнування пектинових та геміцелюлозних зв'язків і сприяє якісному виділенню волокон зі стебел [15].

З метою подальшого використання для проведення експериментальних досліджень проаналізовано принцип роботи трубчастого кавітатора, який працює в режимі нульової моди коливань, тобто здійснює виключно радіальні коливання. Збудження коливань відбувалося за допомогою чотирьох п'єзоелектричних приводів осьового типу, обладнаних ступінчастими трансформаторами швидкості коливань. Вузли підводу ультразвукової енергії розташовувалися на зовнішній циліндричній поверхні вібратора.

Щоб мінімізувати деформаційні спотворення форми коливань при зовнішньому підведенні енергії, секції меншої площі трансформаторів виконані у вигляді ножеподібних елементів, орієнтованих вздовж твірної поверхні циліндра (рис. 1) [18]. Подібна конфігурація дозволяє сфокусувати ультразвукову енергію вздовж поздовжньої осі трубчастого профілю. Для запобігання виникненню радіально-згинних хвиль довжина трубчастого елемента була меншою за половину довжини хвилі таких коливань.



Рис. 1. Ультразвуковий трубчастий кавітатор з радіальною модою коливань

Дослідну установку складає трубчастий вібратор із прозорими знімними торцевими кришками. Живлення п'єзоелектричних елементів здійснюється від високо потужного генератора змінної напруги, який разом із приводами утворює єдину мехатронну систему. Формування сигналу відбувається у генераторі, після чого він підсилювався каскадом потужності та передавався до приводів через узгоджувальні кола для зменшення енергетичних втрат (рис. 2).



Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки

Оскільки п'єзоелектричні випромінювачі є резонансними пристроями, електронна частина системи оснащена зворотними зв'язками за струмом і напругою, що надходили до приводів. Це забезпечує автоматичне налаштування частоти, стабілізацію потужності та захист від перевантажень, а джерело живлення підтримує необхідні рівні напруги для безперервної роботи системи [19].

Отже, трубчастий ультразвуковий кавітатор у радіальній (нульовій) моді створює симетричне поле акустичної енергії, яке здатне рівномірно охопити стебло льону олійного з усіх боків, забезпечуючи одночасну дію кавітації та механічних коливань. У водному середовищі радіальні хвилі формують зони змінного тиску, де утворюються та імплодують мікро пухирці, генеруючи локальні удари і мікро струмені, які руйнують пектиново-геміцелюлозно-лігнінові зв'язки між волокном і деревиною. Одночасно циклічне радіальне стиснення та розширення стебла викликає мікро тріщини у зв'язках, ослаблюючи її та полегшуючи відділення волокна. Конструктивні особливості (довжина менша за половину довжини хвилі, ножеподібні секції трансформаторів) зменшують спотворення коливань і фокусують енергію вздовж осі, що підвищує рівномірність обробки навіть для нерівномірних за діаметром стебел. Система живиться від потужного генератора змінної напруги зі зворотними зв'язками за струмом і напругою, що забезпечує стабільність частоти та амплітуди, дозволяючи підтримувати режим, у якому руйнуються міжклітинні з'єднання без пошкодження самої волокнистої структури. У результаті волокна виділяються чистішими, з мінімальною втратою міцності, а процес є швидким, енергоефективним та екологічно безпечним.

Аналіз принципу дії трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань підтверджує його доцільність для ефективного вилучення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Симетричне кавітаційне поле та рівномірний механічний вплив у водному середовищі забезпечують руйнування пектинових і геміцелюлозних зв'язків без пошкодження самої волоконної структури. Така дія сприяє підвищенню виходу волокна, збереженню його міцності та подовження при розриві, а також підвищує чистоту за рахунок зменшення вмісту пектину й лігніну. Поеднання кавітаційного ефекту, механічної деструктуризації та термічної дії в одному процесі робить технологію енергоефективною, екологічно безпечною та перспективною для впровадження у промислове виробництво з метою підвищення якості й рентабельності переробки льону олійного.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отримані теоретичні результати свідчать, що трубчастий ультразвуковий кавітатор з радіальною модою коливань має значний потенціал для вдосконалення технологій вилучення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Подальші експериментальні дослідження з використанням цієї установки доцільно спрямувати на оптимізацію робочих параметрів — частоти, амплітуди коливань, тривалості обробки та температурного режиму — з метою досягнення максимального виходу волокна при збереженні його міцності та чистоти. Перспективним напрямом є вивчення синергічного ефекту ультразвуку з м'якими хімічними або ферментними обробками, що може знизити енерго- та матеріаломісткість процесу. Такі дослідження дадуть змогу створити науково обґрунтовану, екологічно безпечну та економічно ефективну технологію, придатну для промислового впровадження.

Література

1. Tiwari B.K. Ultrasound: A clean, green extraction technology [Electronic resource] / Brijesh K. Tiwari // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. — 2015. — Vol. 71. — P. 100–109. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
2. Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review [Electronic resource] / Chaoting Wen [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2018. — Vol. 48. — P. 538–549. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>

3. Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers [Electronic resource] / Sullivan Renouard [et al.] // Materials Letters. – 2014. – Vol. 129. – P. 137–141. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.018>
4. A comprehensive review of Ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: principles, advantages, equipment, and combined technologies [Electronic resource] / Lipeng Shen [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2023. – P. 106646. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
5. A Systematic Review on Sustainable Extraction, Preservation, and Enhancement in Food Processing: The Advancement from Conventional to Green Technology Through Ultrasound [Electronic resource] / Shaun Thamsanqa Mgoma [et al.] // Processes. – 2025. – Vol. 13, no. 4. – P. 965. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr13040965>
6. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review [Electronic resource] / Farid Chemat [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – Vol. 34. – P. 540–560. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
7. Ultrasound-assisted extraction of hemicellulose and phenolic compounds from bamboo bast fiber powder [Electronic resource] / Cheng Wang [et al.] // PLOS ONE. – 2018. – Vol. 13, no. 6. – P. e0197537. – Mode of access: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197537>
8. Євтушенко А. В. Сучасний стан первинної переробки луб'яних культур [Електронний ресурс] / А. В. Євтушенко, Г. А. Бойко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2025. – Т. 1, № 1(92). – С. 316–320. – Режим доступу: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.43>
9. Bussemaker M. J. Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications [Electronic resource] / Madeleine J. Bussemaker, Dongke Zhang // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2013. – Vol. 52, no. 10. – P. 3563–3580. – Mode of access: <https://doi.org/10.1021/ie3022785>
10. Exploring Recent Advances in Lignocellulosic Biomass Waste Delignification Through the Combined Use of Eutectic Solvents and Intensification Techniques [Electronic resource] / Cristina Álvarez [et al.] // Processes. – 2024. – Vol. 12, no. 11. – P. 2514. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr12112514>
11. Antioxidant Potential of Hemp and Flax Fibers Depending on Their Chemical Composition [Electronic resource] / Malgorzata Zimniewska [et al.] // Molecules. – 2018. – Vol. 23, no. 8. – P. 1993. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/molecules23081993>
12. Effect of mild alkali/ultrasound treatment on flax and hemp fibres: the different responses of the two substrates [Electronic resource] / Judit Borsa [et al.] // Cellulose. – 2016. – Vol. 23, no. 3. – P. 2117–2128. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0909-y>
13. Goudenhoof C. Flax (*Linum usitatissimum* L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties [Electronic resource] / Camille Goudenhoof, Alain Bourmaud, Christophe Baley // Frontiers in Plant Science. – 2019. – Vol. 10. – Mode of access: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00411>
14. Flax stems: from a specific architecture to an instructive model for bioinspired composite structures [Electronic resource] / Christophe Baley [et al.] // Bioinspiration & Biomimetics. – 2018. – Vol. 13, no. 2. – P. 026007. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa6b7>
15. Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування / О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, А. В. Шульга, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник – Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. – 268 с.
16. Sonoprocessing: From Concepts to Large-Scale Reactors [Electronic resource] / Daniela Meroni [et al.] // Chemical Reviews. – 2021. – Vol. 122, no. 3. – P. 3219–3258. – Mode of access: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00438>
17. Sonication, a Potential Technique for Extraction of Phytoconstituents: A Systematic Review [Electronic resource] / Muhammad Modassar A. N. Ranjha [et al.] // Processes. – 2021. – Vol. 9, no. 8. – P. 1406. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr9081406>
18. Пристрій для кавітаційної обробки рідини: пат. 92987 Україна: C02F 1/36 (2006.01), C02F 1/48, B01D 19/00, A61L 2/02 / О. Луговський, І. Гришко, А. Мовчанюк. – № а200909283; заявл. 09.09.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24
19. Новосад А. А. Особливості застосування ультразвукових резонансних п'єзоелектричних приводів-випромінювачів в системах мехатроніки / А. А. Новосад // Вісник НТУУ «КПІ» Серія – Радіотехніка. Радіо апаробудування. – Київ, 2012 – Вип. 49. – С. 231.

References

1. Tiwari B.K. Ultrasound: A clean, green extraction technology [Electronic resource] / Brijesh K. Tiwari // TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2015. – Vol. 71. – P. 100–109. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
2. Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review [Electronic resource] / Chaoting Wen [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – Vol. 48. – P. 538–549. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>
3. Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers [Electronic resource] / Sullivan Renouard [et al.] // Materials Letters. – 2014. – Vol. 129. – P. 137–141. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.018>
4. A comprehensive review of Ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: principles, advantages, equipment, and combined technologies [Electronic resource] / Lipeng Shen [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2023. – P. 106646. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>

5. A Systematic Review on Sustainable Extraction, Preservation, and Enhancement in Food Processing: The Advancement from Conventional to Green Technology Through Ultrasound [Electronic resource] / Shaun Thamsanqa Mgoma [et al.] // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, no. 4. – P. 965. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr13040965>
6. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review [Electronic resource] / Farid Chemat [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2017. – Vol. 34. – P. 540–560. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
7. Ultrasound-assisted extraction of hemicellulose and phenolic compounds from bamboo bast fiber powder [Electronic resource] / Cheng Wang [et al.] // *PLOS ONE*. – 2018. – Vol. 13, no. 6. – P. e0197537. – Mode of access: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197537>
8. Ievtushenko A. V. Suchasnyi stan pervynnoi pererobky lubianykh kultur [Elektronnyi resurs] / A. V. Yevtushenko, H. A. Boiko // *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. – 2025. – T. 1, № 1(92). – S. 316–320. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.43>
9. Bussemaker M. J. Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications [Electronic resource] / Madeleine J. Bussemaker, Dongke Zhang // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2013. – Vol. 52, no. 10. – P. 3563–3580. – Mode of access: <https://doi.org/10.1021/ie3022785>
10. Exploring Recent Advances in Lignocellulosic Biomass Waste Delignification Through the Combined Use of Eutectic Solvents and Intensification Techniques [Electronic resource] / Cristina Álvarez [et al.] // *Processes*. – 2024. – Vol. 12, no. 11. – P. 2514. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr12112514>
11. Antioxidant Potential of Hemp and Flax Fibers Depending on Their Chemical Composition [Electronic resource] / Malgorzata Zimmiewska [et al.] // *Molecules*. – 2018. – Vol. 23, no. 8. – P. 1993. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/molecules23081993>
12. Effect of mild alkali/ultrasound treatment on flax and hemp fibres: the different responses of the two substrates [Electronic resource] / Judit Borsa [et al.] // *Cellulose*. – 2016. – Vol. 23, no. 3. – P. 2117–2128. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0909-y>
13. Goudenhooff C. Flax (*Linum usitatissimum* L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties [Electronic resource] / Camille Goudenhooff, Alain Bourmaud, Christophe Baley // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Mode of access: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00411>
14. Flax stems: from a specific architecture to an instructive model for bioinspired composite structures [Electronic resource] / Christophe Baley [et al.] // *Bioinspiration & Biomimetics*. – 2018. – Vol. 13, no. 2. – P. 026007. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa6b7>
15. Ultrazvukovi kavitatsiini tekhnolohii. Znezarazhennia ta filtruvannia / O. F. Luhovskyi, I. A. Hryshko, A. I. Zilinskyi, A. V. Shulha, A. V. Movchaniuk, I. M. Bernyk – Vinnytsia: Vydavets FOP Kushnir Yu.V., 2022. – 268 s.
16. Sonoprocessing: From Concepts to Large-Scale Reactors [Electronic resource] / Daniela Meroni [et al.] // *Chemical Reviews*. – 2021. – Vol. 122, no. 3. – P. 3219–3258. – Mode of access: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00438>
17. Sonication, a Potential Technique for Extraction of Phytoconstituents: A Systematic Review [Electronic resource] / Muhammad Modassar A. N. Ranjha [et al.] // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, no. 8. – P. 1406. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/pr9081406>
18. Prystirii dlia kavitatsiinoi obrobky ridyny: pat. 92987 Ukraina: C02F 1/36 (2006.01), C02F 1/48, B01D 19/00, A61L 2/02 / O. Luhovskyi, I. Hryshko, A. Movchaniuk. – № a200909283; zaiavl. 09.09.2009; opubl. 27.12.2010, Biul. № 24
19. Novosad A. A. Osoblyvosti zastosuvannia ultrazvukovykh rezonansnykh piezoelektrychnykh pryvodiv-vyprominiuvachiv v systemakh mekhatroniky / A. A. Novosad // *Visnyk NTUU «KPI» Seriya – Radiotekhnika. Radio aparatobuduvannia*. – Kyiv, 2012 – Vyp. 49. – S. 231.