

УДК 628.16

ПЕРЕРобКА ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНИХ ВІДХОДІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ
ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ
ЕКОНОМІКИ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ

Сидоренко В. В., к.т.н, ст. дослідник, пр.н.с.
відділу тепло- та масообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

Грабова Т. Л., к.т.н., с.н.с., пр.н.с.
відділу тепло- та масообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0000-0002-5194-2474>

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2026-26-16>

Надійшла 25.05.2026. Прийнята після рецензування 16.06.2026. Опублікована 30.06.2026

Ліцензія CC BY-NC-ND 4.0

Предмет. Процес попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси, зокрема методи делігніфікації та інтенсифікація гідролізу рослинної сировини в технології отримання біоетанолу та біогазу. **Мета.** Аналіз сучасних фізико-хімічних методів обробки лігноцелюлозної біомаси та оцінка ефективності технологічних підходів до інтенсифікації гідролізу рослинної сировини. **Методи.** Аналітичні методи дослідження, методи причинно-наслідкового аналізу та логічного узагальнення. Проведено систематизацію наукових даних із міжнародних наукометричних баз, зокрема PubMed, CrossRef, Scopus, WoS, Google Scholar та Index Copernicus. **Результати.** Проведено порівняльний аналіз традиційних (фізичних, хімічних, біологічних) і комбінованих методів попередньої обробки біомаси. Встановлено, що лужна обробка є більш ефективною для видалення лігніну та підвищення доступності целюлози до ферментативного гідролізу. Показано, що застосування ультразвукової та гідродинамічної кавітації сприяє інтенсифікації процесів делігніфікації, збільшенню пористості структури біомаси та підвищенню виходу цільових продуктів. Обґрунтовано перспективність використання роторно-пульсаційних апаратів як ефективного обладнання для комплексної обробки лігноцелюлозної сировини. Удосконалення технології попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси є важливим напрямом підвищення ефективності виробництва етанолу другого покоління та реалізації принципів циркулярної економіки у сфері переробки органічних відходів. **Сфера застосування результатів.** Результати дослідження можуть бути використані у біоенергетичній галузі при розробці та вдосконаленні технологій переробки лігноцелюлозної біомаси для виробництва біоетанолу та інших цінних продуктів. Практичне застосування можливе при проектуванні енергоефективного обладнання та оптимізації технологічних процесів у промислових та напівпромислових установках

Ключові слова: лігноцелюлозна біомаса, делігніфікація, ферментативний гідроліз, гідродинамічна кавітація, циркулярна економіка

PROCESSING OF LIGNOCELLULOSIC WASTE FROM THE FOOD INDUSTRY
AND AGRICULTURE IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY:
TECHNOLOGICAL APPROACHES

Vitalii Sydorenko, PhD, Engineering, Senior Researcher,
Leading Researcher of Department of Heat and mass transfer in disperse systems
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

Tetiana Hrabova, PhD, Engineering, Senior Researcher Scientist,
Leading Researcher of Department of Heat and mass transfer in disperse systems
<https://orcid.org/0000-0002-5194-2474>

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Subject. The process of pretreatment of lignocellulosic biomass, particularly delignification methods and intensification of hydrolysis of plant raw materials in bioethanol and biogas production technologies. **Purpose.** To analyze modern physicochemical methods for processing biomass pretreatment and evaluate effectiveness of technological approaches to intensifying the hydrolysis of plant raw materials. **Methods.** Analytical research methods, causal analysis and logical generalization were applied. Scientific information

from international databases, including PubMed, CrossRef, Scopus, WoS, Google Scholar, and Index Copernicus were systematized. **Results.** A comparative analysis of conventional (physical, chemical, biological) and combined biomass pretreatment was carried out. Alkaline pretreatment was found to be more effective for lignin removal and increasing cellulose accessibility to enzymatic hydrolysis. The application of ultrasonic and hydrodynamic cavitation was shown to intensify delignification processes, increase biomass porosity and improve the yield of target products. The prospects of using rotary-pulsation devices as efficient equipment for integrated processing of lignocellulosic raw materials are substantiated. Improving the pretreatment technology for lignocellulosic biomass is a key area for enhancing the efficiency of second-generation ethanol production and implementing the principles of the circular economy in the field of organic waste processing. **Scope of the results.** The research results can be applied in bioenergy sector for the development and improvement of technologies for processing lignocellulosic biomass into second generation ethanol and other value-added products. Practical application is possible in the design of energy-efficient equipment and optimization of technological processes in industrial and semi-industrial installations.

Key words: lignocellulosic biomass, delignification, enzymatic hydrolysis, hydrodynamic cavitation, circular economy

Постановка проблеми. Формування циркулярної економіки є одним з ключових напрямів сталого розвитку, що передбачає ефективне використання ресурсів, повторне залучення матеріалів у виробничий цикл, мінімізацію утворення відходів та їх подальшу переробку. Особливого значення в межах даної концепції набуває утилізація і переробка органічних, зокрема харчових відходів, які з одного боку становлять екологічну загрозу, а з іншого є потенціалом енергії та вторинної сировини для виробництва біопалива, біодобрив та інших цінних продуктів [1].

Лігноцелюлозні компоненти харчових і сільськогосподарських відходів характеризується високою структурною стійкістю та низькою доступністю для ферментативного гідролізу порівняно з біорозкладними компонентами харчових відходів, таких як крохмалі та цукри [2].

Основними джерелами лігноцелюлозних відходів харчової сировини в Україні є буряковий жом в цукровому виробництві, яблучні, виноградні вичавки, зернові вичавки, облушчені качани кукурудзи, відходи олійно-жирової промисловості, а саме шрот після віджиму олії з соняшника або ріпаку, лушпиння соняшнику, відходи переробки горіхів та кісточкових плодів тощо [3]. Суттєвим джерелом лігноцелюлозних відходів є також рослинні залишки сільськогосподарського походження.

Виробництво етанолу другого покоління є технологічно складнішим і більш енерговитратним порівняно з переробкою крохмалевмісної або цукровмісної сировини. Це зумовлено необхідністю руйнування складної лігноцелюлозної структури та забезпечення доступності целюлози для подальшого ферментативного гідролізу [4, 5].

Успішна конкуренція етанолу другого покоління з етанолом першого покоління, а також з викопним паливом може бути досягнута, зокрема, завдяки впровадженню технологій та обладнання, які дозволяють підвищити ступінь перетворення сировини в етанол без істотного збільшення собівартості, за рахунок вилучення побічних продуктів з їх подальшою трансформацією в цінні продукти [6].

Одним з етапів комплексної обробки рослинної сировини є відокремлення лігніну та геміцелюлози від лігноцелюлозного комплексу з подальшим отриманням з нього цінних хімічних продуктів чи палива. Цей етап є невіддільною частиною попередньої підготовки сировини до гідролізу, проте є найбільш енерговитратним в процесі отримання паливного етанолу [7], що має на меті зруйнувати стійку структуру целюлозної біомаси, зробити целюлозу більш доступною для ферментів, які перетворюють вуглеводні полімери в цукри, що ферментуються [8]. Високі енерговитрати попередньої підготовки сировини до гідролізу обумовлені тим, що цей процес відбувається за підвищених температур та тиску [9]. Тому актуальним науково-технічним завданням є розроблені ефективних методів інтенсифікації

попередньої підготовки біомаси з одночасним зниженням енерговитрат та підвищенням виходу цільових продуктів.

Метою роботи є огляд та аналіз сучасних фізико-хімічних методів обробки лігноцелюлозної біомаси, зокрема методи інтенсифікації гідролізу рослинної сировини в технології отримання біогазу та біоетанолу.

Результати та їх обговорення. Процес гідролізу біомаси включає стадії попередньої підготовки та безпосередньо гідролізу, результатом яких є отримання гідролізату з необхідною концентрацією редукуючих цукрів для подальшого зброджування. На стадії попередньої підготовки відбувається руйнування лігноцелюлозного комплексу з виділенням лігніну, фурфуролу та геміцелюлоз. Традиційні методи попередньої підготовки поділяються на хімічні, фізичні та біологічні. Кожен з зазначених підходів має певні технологічні обмеження, пов'язані зі значними енерговитратами, високою тривалістю процесу або утворенням інгібіторів ферментації [10].

Найбільш поширеними методами попередньої підготовки лігноцелюлозної сировини до гідролізу є кислотна та лужна обробки.

Порівняння впливу різних способів попередньої підготовки, зокрема кислотного та лужного, для покращення ферментативного гідролізу пшеничної соломи та виробництва етанолу розглядалось Torquero [11].

Способи обробки були наступними: термічне автоклавовання (без додавання хімічних реактивів), автоклавовання розведеним розчином соляної кислоти (1,5%, мас./мас.), автоклавовання розведеним розчином гідроксиду натрію (1% мас./мас.) і лужним пероксидом водню (5% мас./мас.). Обробку першими трьома способами проводили протягом однієї години за температури 121°C та співвідношенні тверда речовина/рідина 1/10. Непромита або промита після обробки тверда речовина використовувалась як субстрат на наступній стадії ферментативного гідролізу та наступного зброджування. За свідченням авторів автоклавовання з розведенням лугом доцільніше використовувати як попередню обробку біомаси з наступним промиванням, тоді як попередня термічна обробка та попередня обробка з розбавленою кислотою дають гірші результати. Переваги використання лугу було відмічено як на етапі отримання целюлози протягом попередньої підготовки, так і на етапі отримання глюкози та ксилози протягом наступного ферментативного гідролізу. Зокрема, тверда фракція лужної попередньої обробки показала значне збільшення складу целюлози на 44,0% через різке зниження на 51,0% відсотка кислотонерозчинного лігніну і менш помітне зниження складу геміцелюлози на 11,1% порівняно з термічною та кислотною обробками. Автоклавна обробка в розведеному лужному розчині більш сприяла поділу деяких волокон, тим самим збільшуючи зовнішню площу поверхні та пористість ніж інші, що було підтверджено методом електронної мікроскопії.

В дослідженні [12] було проведено порівняння попередньої обробки соломи пшеничної розведеною сірчаною кислотою, соляною кислотою, азотною кислотою та розчином гідроксиду калію (1%) за наступних умов: температура 130 ± 3°C, тиск – 0,3 МПа, час обробки – 1 год, з наступним ферментативним гідролізом протягом 24 год та подальшою ферментацією протягом тижня.

Автори стверджують, що найбільший вихід етанолу досягається лужною обробкою з попереднім промиванням сировини дистильованою водою та складає 57,7% (гідроліз) та 76,3% (ферментація), що в сумі є найефективнішим серед всіх методів.

Дослідження щодо впливу основних параметрів лужної попередньої підготовки багаси цукрової тростини до гідролізу на видалення лігніну розглядалась Wunna та ін. [13]. Визначали вплив концентрації твердої фази та концентрації лугу на вихід, зокрема лігніну, при автоклавованні за температури 121°C лужних дисперсій з часточками багаси розміром менше за 0,5 мм протягом 120 хв. Визначено, що відсоток видаленого лігніну збільшувався зі збільшенням концентрації лугу.

Максимальне видалення лігніну для концентрації твердої фази 20% склало 87,7% для 1,5% (мас.) гідроксиду натрію протягом 60 хв автоклавування. Для концентрації твердої фази 10% видалення лігніну в кількості 87,3% було досягнуто за концентрації гідроксиду натрію 1,5% (мас.) протягом 30 хв.

Було виявлено, що відсоток видалення лігніну та глюкану значно не збільшувався при збільшенні часу автоклавування для концентрації твердої фази 10%.

У лужному середовищі ефективніше протікають процеси деструкції та екстракції лігніну, а в кислому – процеси деполімеризації полісахаридів [14]. Лужна обробка більш ефективна для сільськогосподарських відходів і трав, ніж для деревних матеріалів [15]. При лужних методах попередньої обробки в порівнянні з обробкою розбавленими кислотними гідроліз протікає в більш м'яких умовах, розпад цукру мінімальний, тому інгібітори ферментів (фурфурол і гідроксиметилфурфурол) утворюються в менших кількостях.

Удосконалення технології попередньої обробки полягає не тільки в застосуванні хімічних методів, а в комбінації з методами фізичного впливу.

Щоб подолати обмеження методів одноразової попередньої обробки, поєднання кількох підходів до попередньої обробки дозволяє використовувати додаткові переваги різних методів, тим самим покращуючи ефективність деградації та використання лігноцелюлози. Цей підхід не тільки покращує швидкість перетворення цукру, але також зменшує споживання енергії та вартість попередньої обробки [16].

Вплив ультразвукової кавітації на вихід лігніну з соломи пшеничної та її вплив на ферментативний гідроліз розглядався в низці досліджень [17, 18].

В статті авторів You та ін. розглядали конверсію лігніну шляхом лужної попередньої обробки кукурудзяних залишків ультразвуком з наступним ферментативним гідролізом [17]. В експериментах з попередньої обробки без ультразвуку 9,1 г висушеної кукурудзяної маси змішували з 91 мл деіонізованої води для утворення суспензії.

Визначені кількості оксид кальцію та гідроксиду натрію (тобто 0,6% та 0,6% відповідно) вводили в суспензію за температури 30-50°C протягом 6-12 годин. В експериментах з попередньої обробки ультразвуком 5 г висушеної кукурудзяної крупи змішували зі 100 мл деіонізованої води для утворення суспензії (співвідношення рідини до твердої речовини 20 мас./мас).

Підготовлені зразки попередньо обробили ультразвуком потужністю 150 Вт та частотою 40 кГц, об'ємом 3,5 л (KQ3200V, Kunshan Ultrasonic Instruments Co., Куньшань, Китай). Ультразвукові випробування проводили за температури 50°C протягом 0,5 години. В результаті авторами визначено, що додавання ультразвукової обробки підвищує видалення лігніну на 10...15%. Найбільший вихід лігніну був за комбінованої обробки та склав 60% мас.

Оцінка впливу термомеханічної та термомеханохімічної попередньої обробки у двошнековому екструдері на засвоюваність пшеничної соломи проводилася Vandenbossche та ін. [19]. Для дослідження було обрано термомеханічні та термомеханохімічні попередні обробки з використанням кислотних, лужних, окиснювальних реагентів та органічних розчинників.

Екструдери мали сім модульних циліндрів, кожен довжиною 200 мм для екструдера BC 45 і 100 мм для екструдера BC21, а також різні двошнекові екструдери з сегментними шнековими елементами довжиною 50 і 100 мм для BC 45 і 12,5, 25 та 50 мм.

Двошнекове екструдювання виконувалося протягом 30 хв. У кожному модулі забезпечувалися певні параметри обробки. Кислотна термомеханохімічна попередня обробка пшеничної соломи призвела до поліпшення засвоюваності целюлози. В результаті екструдювання в лужних умовах обробки майже 50% геміцелюлоз були вилучені при низькому співвідношенні гідроксид натрію/солома (7,3%), і майже всі вони були вилучені за тривалішого часу перебування в екструдері і співвідношенні гідроксид натрію/солома 35%. Водночас 36% лігніну було розчинено.

Останніми роками значну увагу приділено використанню гідродинамічної кавітації, яка характеризується вищою енергоефективністю, простотою масштабування та нижчими експлуатаційними витратами порівняно з ультразвуковою системою для генерації кавітації застосовують сопло Вентурі [21, 22], діафрагму [23–26], кавітаційні генератори на основі відцентрових насосів [27, 28].

Зокрема, експериментальна установка для гідродинамічної кавітації в дослідженні Terán та ін. складалася з резервуара та циліндричного кавітаційного реактора з нержавіючої сталі, які були з'єднані з відцентровим насосом потужністю 1,5 кВт. Діафрагма радіальної форми мала 27 отворів діаметром 1 мм. Тиск вище і нижче за течією підтримувався на рівні 0,3 та 0,03 МПа відповідно (Рис. 1).

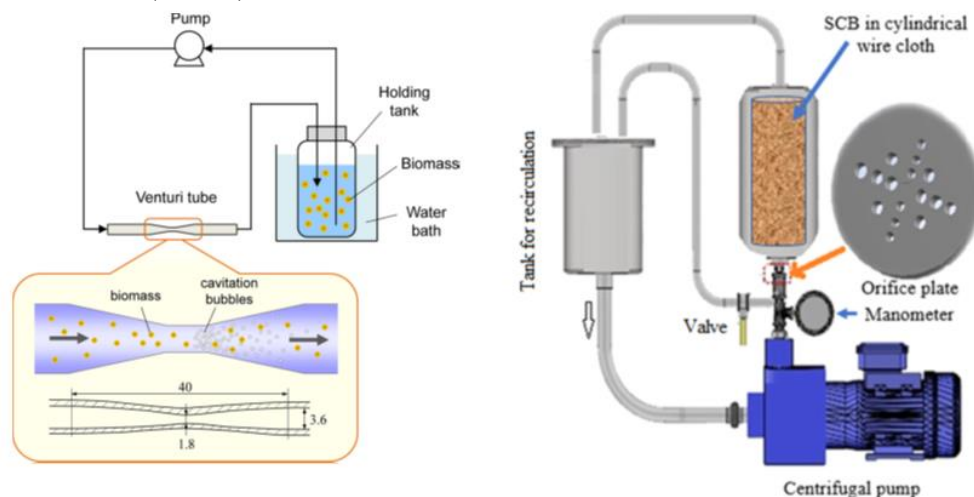


Рис. 1. Пристрої для генерування гідродинамічної кавітації [22, 23]

Співвідношення тверда речовина/рідина розраховували на основі об'єму кавітаційного реактора 100 мл. Часточки багаси використовували в діапазоні від 1,18 до 1,70 мм. Склад сировини був наступним 40,6% глюкозу, 26,3% ксилану та 24,9% лігніну на основі сухої маси. Діапазони умов попередньої обробки були встановлені наступним чином: концентрація гідроксид натрію 0,1–0,5 М, співвідношення тверда речовина/рідина 3–10%, час реакції 15–45 хв. Температура в цьому дослідженні дійсно підвищилася з 23° С до 64° С за 45 хвилин. Таким чином, видалення лігніну та зміни в структурі можна віднести як до ефекту кавітації нижче 50°С, так і до впливу лугу. Понад 53% видаленого лігніну можна досягти за умов 5% гідроксид натрію, 5% співвідношення тверда/рідина та 40 хвилин в режимі обробки гідродинамічною кавітацією.

Ротаційні реактори, або ротаційні генератори гідродинамічної кавітації, або роторно-пульсаційні апарати (переважно дискові та циліндричні) створені на базі відцентрових насосів, у корпус яких додано модифікований ротор і статор.

У цьому типі реактора явище кавітації створюється численними блоками генерації кавітації, розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура цих блоків є фундаментальною для створення кавітації, а також ефективності та економічної ефективності [29]. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з неротаційними реакторами гідродинамічної кавітації [30]. Ротаційні реактори показали чудову продуктивність у порівнянні з неротаційними реакторами в технологіях, пов'язаних з перемішуванням, гомогенізацією, диспергуванням тощо.

Принцип роботи таких пристроїв полягає в акумулюванні енергії в локально роз'єднаних дискретних точках системи з подальшою імпульсною реалізацією для досягнення необхідних фізичних ефектів, а саме: підвищення та скидання тиску, адіабатичне скипання, гідроудар, ударна хвиля, зсувні напруження, локальна турбулентність, кавітація [31].

Вигідною відмінністю таких пристроїв є комбінація гідродинамічної кавітації, що створюється в зонах кавітації, розташованих в робочій зоні апарата, та високо градієнтних зсувних напружень, що виникають між ротором та статором.

Існує декілька досліджень щодо застосування пристроїв з ротором (роторно-статорною парою) для кавітаційної обробки лігноцелюлозної сировини. Зокрема, Kosel та ін. досліджували вплив гідродинамічної кавітації, що генерується роторним гідродинамічним генератором кавітації на процес рафінування пульпи що була сумішшю хвойних порід та евкаліпту у співвідношенні вода/тверда речовина 1, 2, 3% в технології отримання паперу.

Процес рафінування викликає розрив водневих зв'язків між мікрофібрилами, що згодом збільшує поверхню мікрофібрил і здатність волокон встановлювати зв'язки між ними і, таким чином, фібриляцію волокон.

В ході роботи оцінювались швидкість дренажу, як показника ефективності фібриляції волокон, візуальна оцінка операційних умов роботи установки для створення в робочій зоні розвиненої кавітації, а також вплив гідродинамічної кавітації на фізичні властивості отриманого паперу.

Модельна система в цьому дослідженні складається з резервуара об'ємом 2 л, трубопроводу, теплообмінника, вимірювачів тиску та витрати, а також генератора обертання. Блок ротора і статора утворює так звану камеру кавітаційної обробки. І ротор, і статор мають діаметр 50 мм і мають спеціальну геометрію з 12 радіальними зубами, глибиною 3 мм і шириною 4 мм.

Швидкість обертання ротора гідродинамічного генератора кавітації була встановлена до 7000 об/хв, що встановило витрату 11,3 л/хв.

Серед висновків, зроблених авторами слід визначити, що завдяки збільшенню частоти обертання та швидкості зсуву в робочій зоні роторного гідродинамічного кавітатора, в інтервалі інтенсивного розвитку кавітації, було отримано пульпу з вищою швидкістю дренажу, що свідчить про здатність розривати водневі зв'язки між мікрофібрилами целюлози та згодом викликати фібриляцію [27].

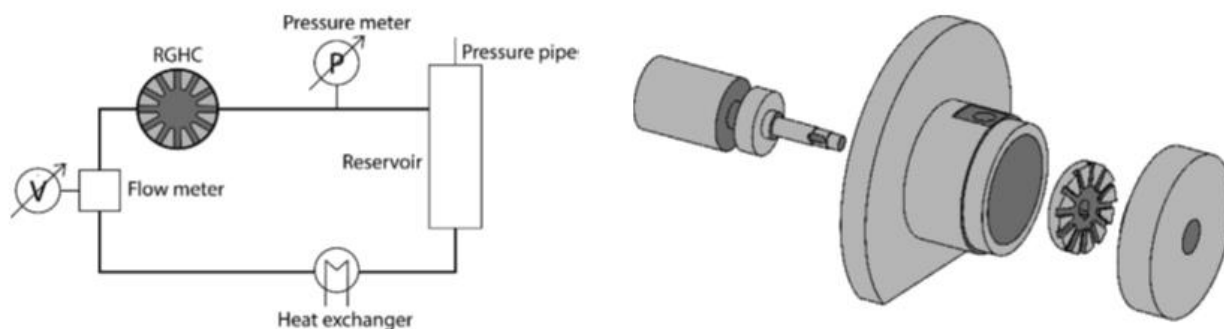


Рис. 2. Схема випробувального стенда модельної системи водопостачання, що містить обертовий генератор кавітації. Основними частинами генератора обертання є: електродвигун, лопатка ротора, передній та задній корпуси (зліва направо) [27]

Метою дослідження Lauberte та ін. було визначення хімічного складу рідких фракцій та твердих залишків біомаси, що виникають внаслідок ультразвукової та/або гідродинамічної попередньої підготовки соломи пшеничної до гідролізу [28]. Окрім хімічного профілю оцінювали антиоксидантну потужність та біологічну активність рідких фракцій, отриманих після попередньої обробки.

Високоінтенсивну попередню обробку ультразвуком (30, 60, 90 і 120 хв) проводили в багаточастотному реакторі на діапазоні частот (25 і 80 кГц та їх комбінаціях). Сировиною слугувала солома пшенична подрібнена спочатку до розміру часток 0.2 мм.

Під час обробки ультразвуком температура всередині реактора стабілізувалася на рівні 25, 30 або 35 °С. Попередню обробку проводили при 29°C у воді або водному розчині

гідроксиду натрію (10% маси, на основі висушеної в печі біомаси). Співвідношення тверда речовина/рідина становило 1/20.

Попередню обробку гідродинамічною кавітацією проводили в роторно-статорному реакторі, що працює при 3000 об/хв, за температури 50°C у водних розчинах гідроксиду натрію (10% маси, на основі висушеної в печі біомаси соломи пшеничної) протягом 30 хв. Співвідношення тверда речовина/рідина становило 1/50. Конструктивні особливості робочого вузла роторно-статорного реактора авторами не наведено.

Отримані авторами дані демонструють, що в присутності луку як гідродинамічна, так і обробка ультразвуком значно знижують вміст лігніну у твердій фракції після попередньої обробки соломи пшеничної. Для гідродинамічної обробки вміст лігніну склав з $21.2 \pm 0.2\%$ до $16.1 \pm 0.2\%$.

Крім того, ці типи попередньої обробки помітно зменшили вміст золи та екстрактивних речовин у твердій біомасі соломи пшеничної. Результати аналітичного піролізу (Py-GC/MS analyses) свідчать про те, що геміцелюлози були частково вилучені з біомаси соломи пшеничної та целюлоза виявилась більш схильною до деполімеризації.

Одним зі способів підвищення ефективності комплексної переробки лігноцелюлозної сировини є використання обладнання, яке дозволяє збільшити ступінь перетворення сировини в основні та побічні продукти. Прикладом такого обладнання є роторно-пульсаційні апарати – ефективні пристрої для інтенсифікації тепло- та масообміну у рідких багатокомпонентних середовищах, які широко застосовуються в технологіях перемішування, гомогенізації, диспергування тощо [31].

В роботі [32] було розглянуто вплив знакозмінних імпульсів тиску та автоклавування на вилучення лігніну з соломи пшеничної протягом попередньої підготовки соломи пшеничної до ферментативного гідролізу в технології отримання паливного етанолу. Роторно-пульсаційний апарат було застосовано, як реактор-змішувач. Робочі органи реактора-змішувача складались з одного ротора та одного статора (рис. 3). Ширина зазору між статором і ротором становила 0,6 мм.

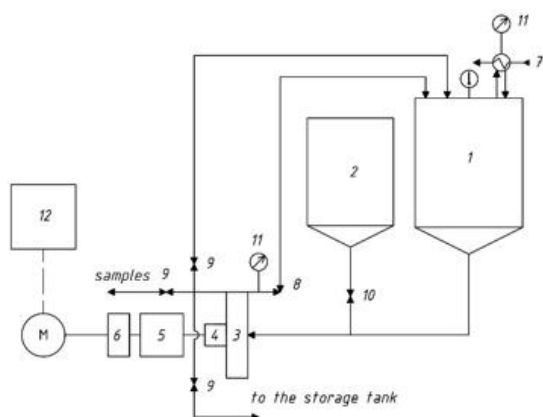


Рис. 3. Гідравлічна схема експериментальної установки:

- 1 – приймальна ємність; 2 – ємність для вихідної сировини; 3 – роторно-пульсаційний апарат (РПА);
- 4 – сальниковий вузол; 5 – підшипниковий вузол; 6 – з'єднувальна муфта;
- 7 – дефлегматор; 8 – кутовий кульовий кран; 9 – кульовий кран Ду 15 (1/2");
- 10 – кульовий кран Ду 25 (1"); 11 – манометр; 12 – блок керування.

Робочі органи реактора-змішувача [32]

В результаті роботи встановлено, що зменшення розміру частинок соломи пшениці з 2... 1 до 0,4... 0,1 мм при початковій температурі 18°C, концентрації луку 1% і швидкості ротора

– 47,75 об/хв протягом 60 хв. призводить до збільшення виходу лігніну з 20 до 42% його загального вмісту.

Крім того, збільшення концентрації луку від 0,5 до 4% зменшує вміст лігніну в зразку до 24,5% від початкового вмісту для автоклавування при 90°C, при 121°C кількість вміст лігніну зменшується до 17,5. Обробка за температури 90°C зменшує вміст лігніну до 18,5%.

Найбільша швидкість делігніфікації спостерігається протягом перших 30 хв. як для автоклавування, так і для обробки. Мінімальний вміст лігніну в зразку склав 21,5% від початкового для автоклавування при 90°C за 60 хв. процесу, при 121°C мінімальний вміст лігніну в зразку спостерігався на 60 хв. та склав 17,5%. Обробка призводить до вивільнення лігніну вміст лігніну в зразку склав до 17,5% на 120 хв.

Підвищення температури також прискорює делігніфікацію. Найбільш ефективно лігнін видаляється в температурному діапазоні 80–121°C. Мінімальний вміст лігніну в зразку для автоклавування склав 17,5% при 121°C. Для обробки максимальне значення видаленого лігніну склало 18,5% при 90°C.

Подальші дослідження авторів було направлено на визначення впливу залучення комплексу фізичних ефектів обробки в роторно-пульсаційному апараті до основних факторів впливу попередньої підготовки лужної суспензії пшеничної соломи на швидкість перетворення целюлози в результаті ферментативного гідролізу для покращення технології отримання паливного етанолу [33].

В результаті досліджень, визначено, що за концентрації луку 1% підвищення швидкості конверсії целюлози після ферментативного гідролізу склала 48,7% при автоклавуванні та 53,4% при обробці. Для концентрації луку 2% швидкість конверсії целюлози склала 57,8 та 63,85% відповідно. Для концентрації луку 4% швидкість конверсії целюлози склала 64,6 та 72,59% відповідно.

Висновки.

В результаті аналізу сучасних методів попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси визначено, що ефективність гідролізу в технології отримання етанолу другого покоління значною мірою визначається ступенем делігніфікації та деструкції лігноцелюлозного комплексу.

Показано що лужна обробка в поєднанні в ультразвуковою та гідродинамічною кавітацією сприяє інтенсифікації процесів делігніфікації, підвищення ступеня конверсії целюлози та збільшення виходу цільових продуктів. Найбільш перспективними для промислового використання є гідродинамічні методи кавітаційної обробки, які характеризуються нижчими енерговитратами, можливістю масштабування та адаптації до безперервних технологічних процесів.

Обґрунтовано перспективність використання роторно-пульсаційних апаратів, як ефективного обладнання для комплексної обробки лігноцелюлозної сировини. Поєднання у таких апаратах ефектів гідродинамічної кавітації, турбулентних потоків, та високоградієнтних зсувних напружень забезпечує інтенсифікацію тепло- масообмінних процесів та підвищує ефективність попередньої підготовки біомаси до ферментативного гідролізу. Таким чином удосконалення технології попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси є важливим напрямом підвищення ефективності виробництва етанолу другого покоління та реалізації принципів циркулярної економіки в сфері переробки органічних відходів.

Бібліографія

1. Гоцій Б., Тульчинський Р., Погребняк А. Напрями розвитку переробки харчових відходів в умовах становлення циркулярної економіки. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2025. Т. 340, № 2. С. 454-458. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-71>.
2. Kumar M., Dutta S., You S. Bioconversion of Food and Lignocellulosic Wastes employing Sugar Platform: A review of enzymatic hydrolysis and kinetics. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 352, Issue 12. 127083. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127083>.

3. Скроцька О. І., Пирог Т. П., Скроцький С. О. Лігноцелюлозні відходи як сировина для синтезу бутанолу клостридіями. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2019. Т. 25, № 1. С. 16-32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_1_4.
4. Cheng M. H., Huang H., Dien B. S., Singh V. The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2019. Vol. 13, № 3. P. 723-739. <https://doi.org/10.1002/bbb.1976>.
5. Robak K. M., Balcerek M. Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. *Food Technology and Biotechnology*. 2018. Vol. 56, Issue 2. P. 174-187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>.
6. Stephen J. D., Mabey W. E., Saddler J. N. Will second-generation ethanol be able to compete with first-generation ethanol? Opportunities for cost reduction. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2011. Vol. 6, № 2. P. 159-176. <https://doi.org/10.1002/bbb.331>.
7. Beig B., Riaz M., Raza Naqvi S., Hassan M., Zheng Z., Karimi K., Pugazhendhi A., Atabani A. E., Thuy Lan Chi N. Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*. 2021. Vol. 287. 119670. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119670>.
8. Xu Z., Huang F. Pretreatment Methods for Bioethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2014. Vol. 174. P. 43-62. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1015-y>.
9. Aftab M. N., Iqbal I., Riaz F., Karadag A., Tabatabaei M. Different Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Use in Biofuel Production, In: A.E. Abomohra (Ed.), *Biomass for Bioenergy – Recent Trends and Future Challenges*, IntechOpen: London, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84995>.
10. Chen J., Ma X., Liang M., Guo Z., Cai Y., Zhu C., Wang Z., Wang S., Xu J., Ying H. Physical–Chemical–Biological Pretreatment for Biomass Degradation and Industrial Applications: A Review. *Waste*. 2024. Vol. 2, Issue 4. P. 451–473. <https://doi.org/10.3390/waste2040024>.
11. Toquero C., Bolado S. Effect of four pretreatments on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of wheat straw. Influence of inhibitors and washing. *Bioresource Technology*, 2014. Vol. 157. P. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.090>.
12. Tutt M., Kikas T., Olt J. Influence of different pretreatment methods on bioethanol production from wheat straw. *Agronomy Research*. 2012. Special issue 1. P. 269-276. <https://agronomy.emu.ee/category/volume-10-2012/special-issue-i-volume-10-2012>.
13. Wunna K., Nakasaki K., Aurensia J., Abella L., Gaspillo P. Effect of Alkali Pretreatment on Removal of Lignin from Sugarcane Bagasse. *Chemical Engineering Transactions*. 2017. Vol. 56. P. 1831–1836. <https://doi.org/10.3303/CET1756306>.
14. Galbe M., Zacchi G. A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology Biotechnology*. 2002. Vol. 59, Issue 6. P. 618–628. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1058-9>.
15. Hsu A. Pretreatment of Biomass, In: Wayman C.E. ed. *Handbook on Bio-ethanol: Production and Utilization*, Taylor & Francis, New York., 1996. <https://doi.org/10.1201/9780203752456>.
16. Meenakshisundaram S., Fayeulle A., Leonard E., Ceballos C., Pauss A. Fiber degradation and carbohydrate production by combined biological and chemical/physicochemical pretreatment methods of lignocellulosic biomass – A review. *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 331. 125053. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125053>.
17. You Z., Pan S.-Y., Sun N., Kim H., Chiang P.-C. Enhanced corn-stover fermentation for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 238. 117813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117813>.
18. Verdini F., Calcio Gaudino E., Grillo G., Tabasso S., Cravotto G. Cellulose Recovery from Agri-Food Residues by Effective Cavitation Treatments. *Applied Science*. 2021. Vol. 11, Issue 10. 4693. <https://doi.org/10.3390/app11104693>.
19. Vandenbossche V., Doumeng C., Rigal L. Thermomechanical and thermo-mechano-chemical pretreatment of wheat straw using a twin-screw extruder. *BioResources*. 2014. Vol. 9, Issue 1. P. 1519-1538. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1519-1538>.
20. Raut-Jadhav S., Badve M. P., Pinjari D. V., Saini D. R., Sonawane S. H., Pandit A. B. Treatment of the pesticide industry effluent using hydrodynamic cavitation and its combination with process intensifying additives (H₂O₂ and ozone). *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 295. P. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.019>.
21. Baxi P. B., Pandit A. B. Using cavitation for delignification of wood. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 110. P. 697–700. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.042>.

22. Nakashima K., Ebi Y., Shibasaki-Kitakawa N., Soyama H., Yonemoto T. Hydrodynamic Cavitation Reactor for Efficient Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Industrial and Engineering Chemical Research*. 2016. Vol. 55, Issue 7. P. 1866–1871. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04375>.
23. Terán Hilaes R., dos Santos J. C., Ahmed M. A., Jeon S. H., da Silva S. S., Han J.-I. Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 214. P. 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.004>.
24. Terán Hilaes R., Medeiros R. D., Prado C. A., Ahmed M. A., da Silva S. S., Santos J. C. Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 290. 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
25. Thangavelu K., Desikan R., Taran O. P., Uthandi S. Delignification of corncob via combined hydrodynamic cavitation and enzymatic pretreatment: process optimization by response surface methodology. *Biotechnology for Biofuels*. 2018. Vol. 11. 203 <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1204-y>.
26. Kim I., Lee I., Jeon S. H., Hwang T., Han, J.-I. Hydrodynamic cavitation as a novel pretreatment approach for bioethanol production from reed. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 192. P. 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.038>.
27. Kosel J., Šinkovec A., Dular M. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for the fibrillation of long conifer fibers in paper production. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. Vol. 59. 104721. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104721>.
28. Lauberte L., Telysheva G., Cravotto G., Andersone A., Janceva S., Dizhbite T., Arshanitsa A., Jurkane V., Veveře L., Grillo G., Calcio Gaudino E., Tabasso S. Lignin – Derived antioxidants as value-added products obtained under cavitation treatments of the wheat straw processing for sugar production. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 303. 126369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126369>.
29. Bimestre T. A., Júnior J. A. M., Canettieri E. V., Tuna E.V. Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresources and Bioprocessing*. 2022. Vol. 9. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>.
30. Sun X., Liu J., Ji L., Wang G., Zhao S., Yoon J. Y., Chen S. A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 737. 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>.
31. Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей /под общей ред. А. А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. К.: Академперіодика, 2015. 464 с.
32. Ободович О. М., Сидоренко В. В. Застосування знакозмінних імпульсів тиску для делігніфікації соломи пшеничної. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. Т. 77, № 4. С. 81–87. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.07>.
33. Блюм Я., Ободович О., Сидоренко В. Вплив умов лужної попередньої обробки рослинної сировини до гідролізу в роторно-пульсаційному апараті на швидкість перетворення целюлози. *Наука та інновації*. 2024. Т. 20, № 6, С. 30–37. <https://doi.org/10.15407/scine20.06.030>.

References

1. Hotsii, B., Tulchynskiy, R., & Pohrebniak, A. (2025). Napriamy rozvytku pererobky kharchovykh vidkhodiv v umovakh stanovlennia tsyrkuliarnoi ekonomiky [Directions for the development of food waste processing in the context of the emergence of a circular economy]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 340(2), 454–458. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-71> [in Ukrainian].
2. Kumar, M., Dutta, S., & You, S. (2022). Bioconversion of Food and Lignocellulosic Wastes employing Sugar Platform: A review of enzymatic hydrolysis and kinetics. *Bioresource Technology*, 352(12), 127083. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127083>.
3. Skrotska O. I., Pirog T. P., Skrotsky S. O. (2019). Lihnotseliulozni vidkhody yak syrovyna dlia syntezu butanolu klostrydiamy [Lignocellulosic waste as a raw material for butanol synthesis by clostridia]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii* [Scientific works of the National University of Food Technologies], 25(1), 16–32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_1_4 [in Ukraine].
4. Cheng, M. H., Huang, H., Dien, B. S. & Singh, V. (2019). The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13, 723-739. <https://doi.org/10.1002/bbb.1976>.

5. Robak, K. M., Balcerek, M. (2018). Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. *Food Technology and Biotechnology*, 56 (2), 174–187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>.
6. Stephen, J. D., Mabee, W. E., Saddler, J. N. (2011). Will second-generation ethanol be able to compete with first-generation ethanol? Opportunities for cost reduction. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6 (2), 159–176. <https://doi.org/10.1002/bbb.331>.
7. Beig, B., Riaz, M., Raza Naqvi, S., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., Pugazhendhi, A., Atabani, A.E., Thuy Lan Chi, N. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, 287, 119670. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119670>.
8. Xu, Z., Huang, F. (2014). Pretreatment Methods for Bioethanol Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174, 43–62. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1015-y>.
9. Aftab, M.N., Iqbal, I., Riaz, F., Karadag, A. & Tabatabaei, M. (2019). Different Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Use in Biofuel Production, In: A.E. Abomohra (Ed.), *Biomass for Bioenergy – Recent Trends and Future Challenges*, IntechOpen: London, <https://doi.org/10.5772/intechopen.84995>.
10. Chen, J., Ma, X., Liang, M., Guo, Z., Cai, Y., Zhu, C., Wang, Z., Wang, S., Xu, J., & Ying, H. (2024). Physical–Chemical–Biological Pretreatment for Biomass Degradation and Industrial Applications: A Review. *Waste*, 2(4), 451–473. <https://doi.org/10.3390/waste2040024>.
11. Toquero, C., & Bolado, S. (2014). Effect of four pretreatments on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of wheat straw. Influence of inhibitors and washing. *Bioresource Technology*, 157, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.090>.
12. Tutt, M., Kikas, T., & Olt, J. (2012). Influence of different pretreatment methods on bioethanol production from wheat straw. *Agronomy Research*, special issue 1, 269–276. <https://agronomy.emu.ee/category/volume-10-2012/special-issue-i-volume-10-2012>.
13. Wunna, K., Nakasaki, K., Auresenia, J., Abella, L., Gaspillo, P. (2017). Effect of Alkali Pretreatment on Removal of Lignin from Sugarcane Bagasse. *Chemical Engineering Transactions*. 56, 1831–1836. <https://doi.org/10.3303/CET1756306>.
14. Galbe, M., Zacchi, G. (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology Biotechnology*, 59 (6), 618–628. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1058-9>.
15. Hsu, A. (1996). Pretreatment of Biomass, In: Wayman C.E. ed. *Handbook on Bio-ethanol: Production and Utilization*, Taylor & Francis, New York. <https://doi.org/10.1201/9780203752456>
16. Meenakshisundaram, S., Fayeulle, A., Leonard, E., Ceballos, C., Pauss, A. (2021). Fiber degradation and carbohydrate production by combined biological and chemical/physicochemical pretreatment methods of lignocellulosic biomass – A review. *Bioresource Technology*, 331, 125053. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125053>.
17. You, Z., Pan, S.-Y., Sun, N., Kim, H., & Chiang, P.-C. (2019). Enhanced corn-stover fermentation for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117813>.
18. Verdini, F., Calcio Gaudino, E., Grillo, G., Tabasso, S., & Cravotto, G. (2021). Cellulose Recovery from Agri-Food Residues by Effective Cavitation Treatments. *Applied Science*, 11(10), 4693. <https://doi.org/10.3390/app11104693>.
19. Vandenbossche, V., Doumeng, C., and Rigal, L. (2014). Thermomechanical and thermo-mechano-chemical pretreatment of wheat straw using a twin-screw extruder. *BioResources*, 9(1), 1519–1538. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1519-1538>.
20. Raut-Jadhav, S., Badve, M. P., Pinjari, D. V., Saini, D. R., Sonawane, S. H., Pandit, A. B. (2016). Treatment of the pesticide industry effluent using hydrodynamic cavitation and its combination with process intensifying additives (H₂O₂ and ozone). *Chemical Engineering Journal*, 295, 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.019>.
21. Baxi, P. B., & Pandit, A. B. (2012). Using cavitation for delignification of wood. *Bioresource Technology*, 110, 697–700. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.042>.
22. Nakashima, K., Ebi, Y., Shibasaki-Kitakawa, N., Soyama, H., & Yonemoto, T. (2016). Hydrodynamic Cavitation Reactor for Efficient Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *Industrial and Engineering Chemical Research*, 55(7), 1866–1871. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04375>.

-
23. Terán Hilaes, R., dos Santos, J. C., Ahmed, M. A., Jeon, S. H., da Silva, S. S., & Han, J.-I. (2016). Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries. *Bioresource Technology*, 214, 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.004>.
24. Terán Hilaes, R., Medeiros, R.D., Prado, C.A., Ahmed, M.A., da Silva, S.S., & Santos, J.C. (2019). Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. *Bioresource Technology*, 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
25. Thangavelu, K., Desikan, R., Taran, O. P., & Uthandi, S. (2018). Delignification of corncob via combined hydrodynamic cavitation and enzymatic pretreatment: process optimization by response surface methodology. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1204-y>.
26. Kim, I., Lee, I., Jeon, S. H., Hwang, T., & Han, J.-I. (2015). Hydrodynamic cavitation as a novel pretreatment approach for bioethanol production from reed. *Bioresource Technology*, 192, 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.038>.
27. Kosel, J., Šinkovec, A., Dular, M. (2019). A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for the fibrillation of long conifer fibers in paper production. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104721. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104721>.
28. Lauberte, L., Telysheva, G., Cravotto, G., Anderson, A., Janceva, S., Dizhbite, T., Arshanitsa, A., Jurkane, V., Vever, L., Grillo G., Calcio Gaudino, E., Tabasso, S. (2021). Lignin – Derived antioxidants as value-added products obtained under cavitation treatments of the wheat straw processing for sugar production. *Journal of Cleaner Production*, 303, 126369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126369>.
29. Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Canettieri, E. V., Tuna E. V. (2022). Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>.
30. Sun X., Liu, J., Ji, L., Wang, G., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Chen, S. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge. *Science of The Total Environment*, 737, 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>.
31. Микро- i нанорівневі процеси в технологіях DIVE: Тематический збірник статей [Micro- and nano-level processes in DPIE technologies: Thematic collection of articles] / edited by A.A. Dolinskij; Institute of Engineering Thermophysics. Kyiv: Akademperryodyka, 2015. 464 p. [in russian, English].
32. Obodovych, O., & Sydorenko, V. (2023). Application of altering pressure impulses for delignification of wheat straw. *Energy Technologies & Resource Saving*, 77 (4), 81–89. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.07> [in Ukrainian].
33. Blume Ya.B., Obodovych O.M., Sydorenko V.V. (2024). The influence of the conditions of alkaline pretreatment of vegetable raw material before hydrolysis in a rotor-pulsation apparatus on the rate of cellulose conversion. *Science and Innovation*. 20(6). 30–37. <https://doi.org/10.15407/scine20.06.0302>.
-