

УДК 628.1

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНЕ ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНИЙ МЕТОД ПАРОВОГО ВИБУХУ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ЛІГНІНОВІСНОЇ СИРОВИНИ НА БІОПАЛИВО

Ободович О.М.¹ д.т.н., Іваницький Г.К.² д.т.н., Целень Б.Я.³ к.т.н., Радченко Н.Л.³ к.т.н.,
Гоженко Л.П.⁴ к.т.н.

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., e-mail: tdsittf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського" пр. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, Україна, д.т.н., проф. кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв; Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.4>

В статті представлено огляд сучасних методів попередньої підготовки малоефективної або непридатної для промислових потреб рослинної сировини для її наступного ферментативного гідролізу в технологіях виробництва біопалива. На основі проаналізованої інформації перспективним визначено метод парового вибуху, однак, складнощі пов'язані з конструктивним виконанням обладнання, суттєво стримують його подальше впровадження. Тому в якості альтернативи запропоновано простіший в реалізації метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), основні принципи якого закладено в роботі роторно-пульсаційного апарата. Проведено порівняння запропонованого методу з методом парового вибуху та визначено, що використання роторно-пульсаційного апарата дозволяє підвищити ступінь біоконверсії в 1,2...1,7 рази у порівнянні з паровим вибухом.

This article presents an overview of modern methods of pretreatment inefficient or unsuitable for industrial needs plant material for its subsequent enzymatic hydrolysis in biofuel production technologies. Based on the analyzed information, the steam explosion method is perspective, however, the difficulties associated with the design of the equipment significantly hinder its further implementation. Therefore, as an alternative, a simpler method of discrete-pulse energy input (DPEI), which is implemented in a rotor-pulsation apparatus, is proposed. The proposed method is compared with the steam explosion method and it is determined that the use of rotor-pulsation apparatus allows increasing the conversion rate by 1.2...1.7 times compared to steam explosion on the example of straw processing.

Бібліографія 30, рис. 1.

Ключові слова: паровий вибух, лігніновмісна сировина, ступінь біоконверсії, роторно-пульсаційний апарат, дискретно-імпульсне введення енергії, біопаливо.

Постановка проблеми. В умовах сучасного дефіциту природних ресурсів особливо актуальним стає питання їх раціонального використання та пошук альтернативних шляхів заміщення. Однією з потенційних можливостей вирішення цієї проблеми є переробка малоефективної чи непридатної для промислових потреб рослинної сировини до якої відносять лісові відходи, соломку, листя, кукурудзиння тощо на

біологічні види енергоресурсів серед яких біоетанол, біометан, біоводень [1]. Така рослинна біомаса маючи унікальні властивості, будову та склад вважається [1] не лише цінним енергетичним джерелом, хімічним компонентом, але й якісним кормовим продуктом або ж напівфабрикатом. На сьогоднішній день цей напрям є відносно новим хоча вже встиг довести свою ефективність та перспективність в США, Китаї [2]

та країнах Європи, які наразі знаходяться на етапі переходу від першого покоління, тобто виробництва біоетанолу з цукру і зерна та біодизелю з олійних культур до виробництва біопалива з целюлозної маси. Так, наприклад, протягом останніх років у США близько 4 % виробничих потужностей біоетанолу використовували целюлозну сировину, а в ЄС лише 25 млн літрів. В Україні виробництво зосереджено головним чином на біоетанолі першого покоління, де основною сировиною слугує кукурудза, меляса, цукровий буряк. Потужності у 2022 році становили близько 381 тис тон на рік, а частка целюлозного біоетанолу поки навіть не виробляється у промислових масштабах. Враховуючи, що Україна має значні обсяги такої сировини, а також з огляду на те, що у найближчій перспективі ЄС планує нарощувати споживання біоетанолу, існує значний потенціал і можливості для успішного розвитку даного напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Використання сучасних високоефективних технологічних підходів при організації цих процесів дозволить у майбутньому розвивати нові енергоефективні технології комплексної переробки рослинної сировини. Одним з потенційно можливих шляхів практичного застосування таких підходів вважається [3–5] організація попередньої обробки сировини, яка проводиться по завершенню етапу її попередньої підготовки (подрібнення, очищення, сушіння) та перед проведенням ферментативного гідролізу і бродіння. Її реалізація передбачає гідротермічну обробку основним завданням якої є розщеплення геміцелюлози на моно- та олігосахариди (пентози, гексози), а також покращення доступу до целюлози та часткове послаблення лігніну [6]. На сьогоднішній день відомо [5, 7, 8] багато методів серед яких: фізичні (механічне подрібнення, екструзія, мікрохвильова, ультразвукова обробка, піроліз, дія імпульсного електричного поля), хімічні (обробка кислотами, лугами, евтектичними розчинниками, іонними рідинами, органічна сольвентна, озоноліз), фізико-хімічні (обробка аміаком, гарячою водою, плазмою, з ефектом парового вибуху, автогідроліз тощо) та біологічна з використанням різноманітних ферментів, грибів. При цьому, не всі вони універсальні, екологічні, ефективні і доступні для реалізації у промислових масштабах. Тобто, вибір методу залежить не лише від типу сировини, але й економічних факторів. Так, з огляду [9, 10] затребуваними сьогодні вважаються метод парового вибуху, автогідроліз, використання іонних рідин, кислот, лугів, сольвентна та біологічна обробка і кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, наприклад, використання кислот вважається ефективним для всіх типів сировини,

оскільки забезпечує максимально високий вихід цукрів, проте, утворення хімічних відходів, які потребують обов'язкової нейтралізації та висока вартість створює ряд складнощів при його реалізації. Використання іонних рідин, теж забезпечує високий вихід цукрів та ефективне руйнування лігніну, однак, існує складність масштабування до промислових потреб та його висока вартість. Лужна обробка реалізується в умовах дії високих температур ($60 \dots 150^\circ\text{C}$) та присутності, наприклад, NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ чи NH_3 . Створювані ефекти дозволяють видаляти лігнін, однак, разом з цим є менш ефективними для геміцелюлози. Використання органічного сольвентного методу передбачає обробку в присутності органічних розчинників (етанолу, метанолу, ацетону чи гліцерину) та води у поєднанні з високою температурою ($150 \dots 200^\circ\text{C}$) і тиском $1 \dots 3$ МПа. Використання органічних розчинників дозволяє ефективно розчиняти лігнін і частково геміцелюлозу, залишаючи целюлозу у вигляді твердого залишку, придатного для подальшого ферментативного гідролізу. До основних переваг методу можна віднести універсальність щодо вибору сировини, ефективне видалення лігніну та високий вихід цукрів. Якщо ж порівнювати його з методом автогідролізу або ж обробкою кислотами, то у даному випадку утворюється значно менше інгібіторів бродіння (фурфуролу, 5-ГМФ). З іншого боку через високу вартість обладнання і органічних розчинників та складність масштабування обладнання до потреб промисловості метод поки не знайшов широкого впровадження. Серед усіх перелічених методів, біологічна обробка вважається найменш ефективною та довготривалою, що відчутно обмежує її промислове застосування хоча метод екологічний та енергоощадний завдяки низькотемпературним режимам обробки ($20 \dots 40^\circ\text{C}$). Найбільш затребуваним сьогодні можна вважати метод автогідролізу, який завдяки екологічності, простоті і невибагливості обладнання в експлуатації, успішно застосовують в країнах ЄС, США, Китаї. Для його реалізації застосовують переважно автоклави або реактори високого тиску. Під час обробки, залежно від типу сировини, в реакторі підтримується стабільною температура $160 \dots 240^\circ\text{C}$ та тиск до 5 МПа без різкого скидання тиску по завершенню обробки. Системи нагрівання забезпечують подачу пари, а фільтраційні центрифуги (преси) розділяють на рідку і тверду фази. Створювані в реакторі режими дозволяють реалізувати хімічний гідроліз геміцелюлози на цукри, досягти послаблення лігніну зі збереженням структури целюлози за рахунок гарячої води. Метод показав ефективність для твердих порід, однак, у випадку необхідності тривалого підтримання температури (до

60 хвилин) можуть утворюватися небажані інгібітори, а з іншої сторони зростають енерговитрати на обробку, що теж є суттєвим недоліком у нинішніх умовах економії енергоресурсів. З огляду [11] відомо про різновид даного методу – вибуховий автогідроліз, який передбачає окрім обробки додатковий перепад тиску по завершенню процесу. Створюваний ефект дозволяє досягти ще й механічного руйнування мікроструктури волокон підвищуючи цим доступ до целюлози. Проте, отримана сировина потребує подальшого очищення перед ферментацією від фурфуролу. Близький за своїм принципом дії вважається [12] метод парового вибуху, який довів свою ефективність при обробці твердих порід сировини. Він відрізняється короткотривалістю (1...10 хвилин) та високотемпературними режимами (180...240 °C) обробки паром під високим тиском 1...3,5 МПа з наступним миттєвим скиданням до атмосферного. Основним ефектом такого впливу є руйнування структури, видалення геміцелюлози, часткове порушення лігніну. Його безумовна перевага у менших енерговитратах, у порівнянні з попереднім. На сьогоднішній день саме він вважається найбільш перспективним завдяки екологічності та можливості отримання волокна з високою питомою поверхнею і реакційною здатністю. Також вважається, що така попередня активація сировини сприяє інтенсифікації процесу делігніфікації, а також кислотному і ферментативному гідролізу лігноцелюлозної сировини. Разом з цим існує можливість скорочення витрати реагентів, загальних енерговитрат та потенціал для розширення номенклатури порід деревини для делігніфікації та підвищеної якості отримуваної целюлози.

Отже, проаналізувавши сучасні тенденції переходу виробництва біопалива від першого покоління до другого, коли основною сировиною стає малоефективна чи непридатна для промислових потреб рослинна сировина, а також технології і можливі шляхи підвищення їх ефективності, визначено перспективним попередню обробку сировини перед її гідролізом. Вивчивши методи, які застосовують на даному технологічному етапі виробництва, їх недоліки та умови подальшого успішного розвитку і впровадження, перспективним визначено метод парового вибуху. У зв'язку з цим, дані дослідження спрямовані на вирішення наукової проблеми в галузі розробки високоефективних технологій глибокої хімічної переробки відходів деревини і рослинної сировини з використанням методу попередньої паровибухової модифікації і отриманням цінних енергетичних продуктів серед яких біоетанол. Завданням досліджень поставлено вивчення та аналіз

особливостей перебігу та реалізації методу парового вибуху в процесах біоконверсії лігноцелюлозної сировини з отриманням біопалива, проведення літературного огляду щодо наукових напрацювань у даному напрямку і експериментальне вивчення доцільності використання методу дискретно-імпульсного введення енергії (далі – ДІВЕ) як альтернативного високоефективного методу біоконверсії лігноцелюлозної сировини при виробництві біопалива у порівнянні з методом парового вибуху.

Огляд стану проблеми. Особливість реалізації процесу “парового вибуху” полягає у створенні короткотривалого високотемпературного впливу на зволожену лігноцелюлозну сировину в умовах швидкого перепаду тиску з підвищеного до атмосферного. Створювані в реакторі під час обробки умови ініціюють прискорення гідролізу геміцелюлози супроводжуючись деструкцією лігніну і зменшенням його молекулярної маси. Використання парогенератора дозволяє створити високотемпературну пару (до 240 °C), а фільтраційні системи – відділити фракції після завершення обробки. При цьому, охолоджувальні системи забезпечують необхідну динаміку зниження температури після скидання тиску. За рахунок створюваного перепаду тиску відбувається фракціонування сировини на компоненти з наступним розділенням на рідку фазу, яка являє собою розчин моноцукрів і низькомолекулярної фракції лігніну, котрі в подальшому вилучаються екстракцією та твердий залишок целюлози і лігніну. Разом з цим перепад тиску створює ефект розширення перегрітої води і пари, який веде до руйнування клітинної структури деревини зі збільшенням питомої поверхні, утворенням водорозчинних продуктів, що містять олігомери ксилану, ксилозу та інші моносахариди, а також глюкуронову кислоту, лігнін, таніди, жирні кислоти, на що вказують відомі дослідження [13, 14]. Цими ж авторами у подальших дослідженнях доведено ефективність застосування даного методу на прикладі розщеплення волокна костри, костри коноплі і льону, а також виділення геміцелюлози, лігніну, пектинів і воску з наступною обробкою водою і 0,4 %-м розчином луку.

Механізм перебігу процесу “парового вибуху” детально проаналізовано в роботах [15–17], зокрема, авторами показано, що зростання швидкості та скорочення тривалості процесу декомпресії веде до інтенсивного зменшення розміру частинок і збільшення питомої поверхні. Швидкий перепад тиску створюється за рахунок збільшення швидкості відкривання клапана для скидання тиску і видалення обробленої сировини. Процес супроводжується вивільненням потенціальної

енергії перегрітої рідини забезпечуючи заданий ступінь розриву частинок. Ефект зменшення розміру частинок і збільшення питомої поверхні в результаті “парового вибуху” має важливе значення при подальшому ферментативному гідролізі рослинної сировини. В роботах Гравітіса [13] та інших авторів [5, 15–18] теж вивчалися теоретичні і прикладні аспекти методу “парового вибуху”, а також стан проблем та технічне оснащення. В роботах [5, 18] наводиться інформація про класифікацію за режимами ведення процесу на прикладі різних типів сировини. Зокрема, для сировини з низьким вмістом лігніну авторами рекомендується температурний діапазон 160...190 °C та тиск до 2 МПа; для соломи і листя – 190...210 °C та тиск 1,5...2,5 МПа при 2...5 хвилинній тривалості обробки; для твердої сировини, наприклад, хвойної деревини оптимальним вважається 210...240 °C, а тиск 2...3,5 МПа протягом 5...10 хвилин циклу обробки. Крім цього, метод класифікується [15] за видами каталізаторів, які додаються при обробці сировини, типом реактора (періодичний, безперервний), за вологістю сировини (висока – 30...50 % та низька менше 20 %). Якщо розглядати фізичну модель перебігу процесу, то вона передбачає обробку сировини в реакторі, куди на початку процесу подається нагріта водяна пара. Протягом заданого проміжку часу досягаються необхідні температура і тиск, котрі залишаються константами під час обробки. Час виходу на режим не перевищує 30 с., а обробки – близько кількох хвилин. Підвищення температури і тиску скорочує інтервал часу обробки. На останньому етапі обробки, який займає 0,1...1 с відбувається адіабатне розширення. Процес може реалізовуватись за схемою безперервної та періодичної дії. Періодична існує в кількох варіаціях, зокрема, перший включає: генератор пари, реактор та циклон з пристроєм для конденсату. Дана схема розрахована на обробку сировини при високому тиску і температурі до 250° C. За наведеною схемою працюють переважно в країнах США, Канаді та Швеції. Другий варіант схеми передбачає обробку при температурі до 200° C і тиску до 13,8 МПа з попереднім пропусканням волокнистої сировини через спеціальне сопло для того, щоб його розщепити перед адіабатним розширенням. Схема організації неперервного процесу передбачає використання реактора шнекового типу з системою безперервної подачі пари і сировини. Різниця у тому, що обробка проводиться при більш низьких температурах і тиску, що дозволяє отримувати сировину ще додатково для виробництва кормових продуктів. Безумовною перевагою методу є можливість отримання продукту, який можна легко розділити на окремі, умов-

но чисті компоненти. Зокрема, вилучати геміцелюлозу і пентозні цукри, які є зайвими у виробництві етанолу під час організації процесу бродіння та збільшити вихід моносахаридів С6 групи. Разом з цим досягається збільшення питомої поверхні сировини за рахунок миттєвого зниження тиску і вибухового закипання рідини всередині волокон, що веде до взаємного розщеплення волокон підвищуючи доступність клітин стінки для гідролізуючих агентів, як кислотних, так і для ферментних препаратів. Можливість підвищення реакційної здатності субстратів до гідролізу представляє значний інтерес для дослідників та створює значні перспективи для подальшого вивчення і розвитку даного напрямку в цілому. На сьогоднішній день основним стримуючим фактором є складність конструктивного виконання системи швидкого скидання тиску, високі вимоги до безпеки та організація процесу миттєвого вилучення отриманого в результаті обробки продукту.

На думку авторів даної роботи вагомою альтернативою паровому вибуху може стати використання методу ДІВЕ, де за рахунок направленої використання створюваних ефектів є можливість підвищення реакційної здатності (ступеню біоконверсії) біомаси. Основна ідея методу ДІВЕ полягає у тому, щоб попередньо введену і довільним чином розподілену в робочому об’ємі енергію акумулювати сконцентрувавши в локальних і дискретно розподілених точках системи та в подальшому імпульсно її реалізувати для досягнення необхідних фізичних ефектів. Найбільшу ефективність метод ДІВЕ проявив [19–21] для двофазних гетерогенних систем з кількома компонентами, в т. ч. нерозчинними і з низькою інтенсивністю тепломасообмінних процесів. Для його реалізації використовуються процеси перемішування, емульгування, гомогенізації дисперсного компонента чи дисперсної фази. Тобто явище зменшення розміру включень, підвищення ступеня їх однорідності, збільшення сумарної поверхні контакту компонентів чи фаз, що є важливим показником в промислових процесах у тому числі і на етапі попередньої підготовки сировини для її наступної переробки або ж гідролізу. Використання методу ДІВЕ дозволяє створювати значні градієнти чи перепади значень тиску, швидкості, температури, концентрації густини, хімічних потенціалів, потенціалів електричного чи магнітного полів та досягти надвисоких концентрацій енергії і речовин на міжфазових поверхнях, підвищення ККД у порівнянні з традиційним обладнанням [22, 23]. Підведена енергія може бути тепловою, механічною, електричною, електромагнітною тощо. Технологія ДІВЕ може реалізовуватись в багатофазних системах чи однофазних, які можуть трансфор-

муватись під впливом ДІВЕ в багатофазні. При цьому одна з фаз повинна бути стисливою у порівнянні з іншими. Переважна більшість традиційних фізико-хімічних технологій потребує енерговитрат реалізуючись в апаратах із зовнішнім підведенням енергії. При цьому, коефіцієнт корисного підведення енергії досить низький і не перевищує 10 %. Головна проблема полягає у тому, що основний опір процесам тепломасопереносу зосереджений на обмежено малій міжфазній поверхні і саме в цю зону необхідно ввести необхідну енергію. В традиційному обладнанні енергія рівномірно розподілена по всьому об'єму, а тому її основна частина витрачається на циркуляцію взаємодіючих компонентів. Використання процесів і обладнання заснованих на принципах ДІВЕ позбавлене цих недоліків і дозволяє значно підвищити енергетичні показники процесу головним чином за рахунок реалізації ефектів енергозбереження. На сьогоднішній день метод ДІВЕ реалізується за рахунок різноманітного тепломасо-обмінного обладнання. Однак, в першу чергу застосовуються апарати роторно-пульсаційного типу (далі – РПА), які знайшли широке застосування в різних галузях промисловості [24–27], перш за все, при проведенні базових технологічних операцій. Серед основних – диспергування, перемішування, розчинення, теплова обробка, гідроліз. В якості оброблюваного середовища найбільш перспективною вважається переробка рослинної сировини і складних біологічних систем для потреб енергетики, харчової, консервної, а також фармацевтичної індустрії. При цьому, найбільшу ефективність показали апарати циліндричного типу. Їх основна особливість полягає у трьох коаксіально розміщених циліндричних елементах: двох статорів і ротора зі щільними зазорами між ними. На поверхнях статорів і ротора паралельно осі обертання з однаковим кроком розташовано щільні отвори однакової ширини, які взаємно перекриваються при обертанні ротора. Робота апарата створює умови для тангенціального руху рідини в кільцевих зазорах і, внаслідок, дії відцентрових сил її радіальне переміщення через щільні отвори ротора і статорів. Під час обробки в РПА оброблювана сировина циркулює, піддаючись багатократному розриву потоку за рахунок взаємного перекриття щільних статорів ротора і статора з періодичністю порядку 2...6 кГц. Під час перекриття щільних статора поверхнею ротора, потік оброблюваної сировини в щільних каналах статора миттєво гальмується. Час від моменту перекриття отворів до повного перекриття не перевищує 0,3 мс, повного перекриття 0,1 мс, а час розкриття отворів 0,3 мс. Цикл зміни прохідного перерізу каналу для руху сировини в радіальному напрямку повторюється кожні 0,7 мс. Тобто стадія повного розкриття каналу фактично відсутня. Під час перекриття і зумовленого цим гальмування потоку в каналах першого (внутрішнього) статора виникають високоамплітудні пульсації тиску. При цьому кінетична енергія потоку періодично трансформується в потенціальну енергію з ініціюванням явища гідравлічного удару в якості супутнього ефекту. В щільних каналах другого статора внаслідок різкого скидання тиску під час перекриття каналу і його швидкого розкриття, періодично створюються потужні швидкодійні ефекти вибухового закипання і кавітаційного схлопування. Частота і амплітуда цих пульсацій залежить як від швидкості обертання ротора, так і від кількості щільних та швидкості потоку всередині апарата. Рух потоку в радіальному напрямку відбувається в пульсуючому режимі. Таким чином, лінійна швидкість руху в щільних каналах змінюється від максимуму до мінімуму. Середнє значення радіальної швидкості 0,463 м/с набагато нижче тангенціальної швидкості потоку в зазорах. Максимально можлива радіальна швидкість 1,08 м/с, що на порядок менше тангенціальної швидкості біля поверхні ротора. Наслідком невисоких значень лінійної швидкості є відносно низький рівень розвитку динамічних ефектів пов'язаних з гальмуванням і прискоренням потоку, а також супутніх ефектів гідравлічного удару. Величина прискорення в каналі I статора при перекриванні і наступному розкритті щільних отворів становить $3,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$. При миттєвому перекритті отворів на виході з каналів I статора в кожному з цих каналів виникає ефект гідравлічного удару. В момент повного перекриття каналу потік сировини рухається в каналі довжиною l зі швидкістю 1,08 м/с і до моменту повного перекриття каналу становить 0,3 мс., гальмуючи до значень близьких до нуля. Внаслідок цього у вихідному перерізі каналу формується імпульс високого тиску, який розповсюджується назустріч потоку до вхідного перерізу каналу зі швидкістю звуку, котра залежить від властивостей оброблюваної сировини. Через невеликий проміжок часу підвищений тиск змінюється розрідженням і протягом даного ж проміжку часу, знаходиться під низьким тиском. За час повного перекриття отвору в каналі відбувається не менше десяти осциляцій тиску. Якщо час перекриття каналу перевищує тривалість фази удару, то відбувається непрякий гідравлічний удар, для якого амплітуда імпульсу тиску залежить від співвідношення фази удару до часу закриття і становить 0,028 МПа, а частота затухаючих коливань близько 90 кГц. При середній радіальній швидкості 0,463 м/с сировина проходить щільний ка-

вини в радіальному напрямку повторюється кожні 0,7 мс. Тобто стадія повного розкриття каналу фактично відсутня. Під час перекриття і зумовленого цим гальмування потоку в каналах першого (внутрішнього) статора виникають високоамплітудні пульсації тиску. При цьому кінетична енергія потоку періодично трансформується в потенціальну енергію з ініціюванням явища гідравлічного удару в якості супутнього ефекту. В щільних каналах другого статора внаслідок різкого скидання тиску під час перекриття каналу і його швидкого розкриття, періодично створюються потужні швидкодійні ефекти вибухового закипання і кавітаційного схлопування. Частота і амплітуда цих пульсацій залежить як від швидкості обертання ротора, так і від кількості щільних та швидкості потоку всередині апарата. Рух потоку в радіальному напрямку відбувається в пульсуючому режимі. Таким чином, лінійна швидкість руху в щільних каналах змінюється від максимуму до мінімуму. Середнє значення радіальної швидкості 0,463 м/с набагато нижче тангенціальної швидкості потоку в зазорах. Максимально можлива радіальна швидкість 1,08 м/с, що на порядок менше тангенціальної швидкості біля поверхні ротора. Наслідком невисоких значень лінійної швидкості є відносно низький рівень розвитку динамічних ефектів пов'язаних з гальмуванням і прискоренням потоку, а також супутніх ефектів гідравлічного удару. Величина прискорення в каналі I статора при перекриванні і наступному розкритті щільних отворів становить $3,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$. При миттєвому перекритті отворів на виході з каналів I статора в кожному з цих каналів виникає ефект гідравлічного удару. В момент повного перекриття каналу потік сировини рухається в каналі довжиною l зі швидкістю 1,08 м/с і до моменту повного перекриття каналу становить 0,3 мс., гальмуючи до значень близьких до нуля. Внаслідок цього у вихідному перерізі каналу формується імпульс високого тиску, який розповсюджується назустріч потоку до вхідного перерізу каналу зі швидкістю звуку, котра залежить від властивостей оброблюваної сировини. Через невеликий проміжок часу підвищений тиск змінюється розрідженням і протягом даного ж проміжку часу, знаходиться під низьким тиском. За час повного перекриття отвору в каналі відбувається не менше десяти осциляцій тиску. Якщо час перекриття каналу перевищує тривалість фази удару, то відбувається непрякий гідравлічний удар, для якого амплітуда імпульсу тиску залежить від співвідношення фази удару до часу закриття і становить 0,028 МПа, а частота затухаючих коливань близько 90 кГц. При середній радіальній швидкості 0,463 м/с сировина проходить щільний ка-

нал І статора за час порядку 10 мс і за цей проміжок відбувається перекриття каналу (близько 15 разів) і, відповідно, стільки ж раз кожен елементарний об'єм піддається впливу гідравлічного удару. Хоча амплітуди пульсацій тиску при гідравлічному ударі порівняно невеликі, неперервність і висока частота цих пульсацій безумовно є визначальними при гідромеханічній обробці. Існує значна відмінність у перебігу гідродинамічних процесів в каналах зовнішнього статора (II). Так, у момент суміщення щілинних отворів ротора і статора в каналі зовнішнього статора швидкість потоку максимальна. При перекритті отворів потрапляння сировини в канал статора спочатку сповільнюється, а потім фактично припиняється, так як її незначне потрапляння відбувається тільки за рахунок транзитного руху з радіального зазору між ротором і статором. Сировина, що перебуває в каналі, спрямовується до виходу з каналу, а інерційні сили створюють напруження розтягування. По мірі звільнення каналу тиск швидко знижується від нормального до тиску насиченої пари при температурі середовища, що викликає вибухове закипання в середині каналу. Протягом всього часу відбувається інтенсивне зростання бульбашок. При чому на початковій стадії швидкість росту досягає 1000 м/с. При відкриванні отвору в канал І статора надходить імпульс високого тиску, що веде до інтенсивного схлопування великої кількості бульбашок з виділенням високо амплітудного імпульсу тиску. В результаті чого за короткий проміжок часу тиск зростає до кількох атмосфер до моменту наступного перекриття отворів. Таким чином, всередині каналу II статора постійно з частотою порядку 2...6 кГц відбуваються високоамплітудні коливання тиску, внаслідок чого виникає потужний гідроакустичний ефект. Кавітаційні явища, які відбуваються в каналі статора і супутні з ними фазові перетворення можна розглядати як акустичну кавітацію, що є одним з найбільш жорстких механізмів ДІВЕ, який широко використовується з метою інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів в дисперсних середовищах. Тотожність кавітаційних процесів, які відбуваються у зовнішньому статорі РПА і явища акустичної кавітації підтверджують експериментальні дані. В роботі [28] наведено дані кавітаційного кластера, утвореного магнітострикційним випромінювачем при статичному тиску 0,2 МПа, а також охарактеризовано кавітаційний кластер в каналі статора РПА. Подібність форми і структури обох кластерів дає підставу для припущення щодо тотожності механізмів їх формування і стабілізації. Представлені дані про особливості методу ДІВЕ, механізмів і фізичних явищ,

які відбуваються в робочих органах РПА, дають можливість зробити припущення про ефективність його використання в технологіях біоконверсії лігноцелюлозної сировини при отриманні біопалива. З цієї метою на експериментальному стенді основою якого є описаний вище РПА, проведено комплекс досліджень з обробки рослинної сировини, оцінку його ефективності за показником ступеня біоконверсії і порівняння одержаних результатів зі зразками обробленими методом парового вибуху.

Опис експериментального стенда. Для визначення доцільності застосування пропонованого методу ДІВЕ, який реалізується в РПА передбачено його порівняння з методом парового вибуху на прикладі обробки соломи. Критерій оцінювання – реакційна здатність (ступінь біоконверсії) лігноцелюлозної біомаси.

Під час експерименту обробку сировини проводили в РПА з наступними конструктивними характеристиками: кількість щілинних отворів на поверхні ротора (статора) 30 шт., об'ємна витрата сировини, яку піддавали обробці $1 \cdot 10^{-3}$ м/с; кутова швидкість обертання ротора 47,5 об/с; тангенціальна швидкість внутрішньої поверхні ротора 8,9 м/с; тангенціальна швидкість зовнішньої поверхні ротора 9,53 м/с.; усереднене значення тангенціальної швидкості ротора 9,54 м/с, час обробки в режимі рециркуляції – 20...50 хвилин при 2000...5000 об/хв. Гідромодуль для обробки соломи в РПА становив 10:1, що відповідає 10 кг розчину з 0,1 % NaOH на 1 кг сухої соломи. Обробку проводили при температурі сировини 20 °С. Для статичної достовірності експерименти повторювали тричі. Для контролю використовували необроблені зразки соломи. Одержані результати ступеня біоконверсії соломи порівнювали з даними літературних джерел [29, 30] ступеня біоконверсії соломи обробленої методом парового вибуху (при аналогічних режимах). У першому випадку дані порівнювали з літературними при обробці у присутності H_2SO_4 , у другому – у присутності $Ca(OH)_2$, у третьому порівнювали з експериментальними при обробці в РПА – в присутності NaOH.

Результати. Отримані результати експериментальних досліджень та дані літератури для порівняння [28, 29] наведено на діаграмі 1.

Одержані результати свідчать, що у порівнянні з методом парового вибуху обробка в РПА дозволяє досягти найбільшого ступеня біоконверсії (61 %), причому, незалежно від виду застосованого реагента. Одержаний ефект можна пояснити комбінацією впливу механічної, гідродинамічної та кавітаційної дії спрямованої на руйнування структури оброблюваної сировини та підвищення



Рис. 1. Реакційна здатність (ступінь біоконверсії) зразків соломи, що пройшли попередню обробку різними методами та контрольний зразок необробленої соломи

Fig. 1. Reactivity (degree of bioconversion) of straw samples pretreated with different methods and a control sample of untreated straw

її реакційної здатності. Створювані в РПА механічні ефекти дозволяють досягти зменшення розміру часток до 0,1...1 мм, що збільшує площу міжфазної поверхні. Мікровибухи, спричинені кавітацією, призводять до розриву лігноцелюлозної матриці підвищуючи пористість, а гідродинамічний вплив, зумовлюючи високошвидкісні потоки рідини, сприяє видаленню частини геміцелюлози та модифікації лігніну. Сукупний вплив усіх цих процесів дозволив покращити показник ступеня біоконверсії, а невисока температура обробки не створює ризику утворення небажаних інгібіторів та дозволяє уникнути деградації цукрів. Подібні ефекти неможливо реалізувати при використанні методу парового вибуху навіть при підвищенні рівня питомих енерговитрат.

Одержані результати показали можливість підвищення ефективності попередньої обробки лігноцелюлозної сировини на прикладі соломи для її наступного гідролізу за рахунок використання РПА в якому реалізовано принципи методу ДІВЕ.

Висновки. Проаналізовано існуючі методи попередньої підготовки сировини перед проведенням її гідролізу та визначено, що найбільш перспективним на сьогодні є паровий вибух. Проаналізовано особливості та складності пов'язані з перебігом і реалізацією даного процесу та на їх основі визначено, що основна проблема полягає у складності конструктивного виконання обладнання, яке має забезпечити практично миттєве видалення отриманого після парового вибуху продукту. Існування даного фактору суттєво стримує широке

впровадження, а тому як альтернативу запропоновано більш простий в реалізації метод ДІВЕ, основні принципи якого закладено в роботі РПА. Проведено порівняння запропонованого методу з методом парового вибуху. Оцінювання результатів за ступенем біоконверсії показало, що використання РПА, який реалізує ефекти ДІВЕ дозволяє підвищити ступінь біоконверсії (реакційну здатність), на прикладі обробки соломи, обробленої в лужному середовищі в 1,2...1,7 рази у порівнянні з паровим вибухом. Зокрема, обробка в РПА дозволила досягти 61 % (в присутності NaOH), а обробка з використанням парового вибуху (в присутності $Ca(OH)_2$) – 36 % та 49 % (в присутності H_2SO_4).

В подальшому пропонується обладнання може використовуватись в технологіях виробництва біопалива, однак, потребує додаткових досліджень для визначення оптимальних умов ведення процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. L. Zhao, Z. Sun, C. Zhang, J. Nan, N. Ren, D. Lee, C. Chen. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 343. P. 126123 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123>
2. L. Zhao, X. Zhang, J. Xu, X. Ou, S. Chang, M. Wu. Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic biomass in china: dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. *Energies*. 2015. 8(5). P. 4096-4117 <https://doi.org/10.3390/en8054096>

3. Шульга С. М., Тігунова О. О., Блюм Я. Б. Лігноцелюлоза як альтернативна сировина для отримання біобутанолу. Біотехнологія. 2013. Т. 6(2). С. 9-20. <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0000037729>
4. E. Ximenes, C. Farinas, Y. Kim, M. Ladisch. Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production. Hydrothermal Processing in Biorefineries. 2017. P. 181-205 https://doi.org/10.1007/978-3-319-56457-9_7
5. P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, M.J. Negro pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review Bioresource Technology. 2010. Vol. 101(13). 2010. P. 4851-4861 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
6. N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Lee, M. Holtzapple, M. Ladisch Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass Bioresource Technology 2005. Vol. 96(6). P. 673-686 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
7. V. Balan, B. Bals, S. Chundawat, D. Marshall, B. Dale. Lignocellulosic biomass pretreatment using AFEX Methods Mol Biol. 2009. Vol. 581. P. 61-77 https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_5
8. R. Ravindran, A. Jaiswal A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and Opportunities. Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 92-102 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106>
9. T. Scapini, M. Santos, C. Bonatto, J. Wancura, J. Mulinari, A. Camargo, N. Klanovicz, G. Zabet, M. Tres, G. Fongaro, H. Treichel Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. Bioresource Technology. 2021. Vol. 342. P. 126033 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033>
10. M. Yiasmin, A. Waleed, X. Hua. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass and by-products for lignocellulolytic enzymes modification: a review. International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2021. Vol. 7(1). P. 102-143 <https://doi.org/10.51193/IJAER.2021.7108>
11. О. Тігунова, Н. Бейко, Д. Каменських, Т. Ткаченко, В. Євдокименко, В. Кашковський, С. Шульга Лігноцелюлозна біомаса після вибухового автогідролізу як субстрат для отримання бутанолу «Biotechnologia Acta». 2016. Т. 9. № 4. С. 28-34 <https://doi.org/10.15407/biotech9.04.028>
12. T. Pielhop, J. Amgarten, M. Studer & Philipp Rudolf von Rohr. Pilot-scale steam explosion pretreatment with 2-naphthol to overcome high softwood recalcitrance Biotechnology for Biofuels. 2017. 10(130). P.1-13 <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0816-y>
13. Gravitis, Y. (1987). Theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of plant biomass. Wood Chemistry. (5). 321.
14. Raushenberg N., Dhara K., Palmer J., Glasser W. Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic resources – structure and properties. American chemical society polymer preprints, division of polymer chemistry. 1990. Vol. 31(1). P. 650-652 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/bk-1990-0339>
15. Jacquet N., et al. Influence of steam explosion on physicochemical properties and hydrolysis rate of lignocellulosic biomass. Bioresources. 2015. 10(3). P. 4611–4627 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.073>
16. Pielhop T., Amgarten J., von Rohr, P.R. et al. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. Biotechnol Biofuels. 2016. 9. 152. P. 1-13 <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1>
17. I. Ziegler-Devin, L. Chrusciel, N. Brosse. Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Frontiers in Chemistry. 2021. 9. P.705358 <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358>
18. A. Kumar, S. Sharma. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review Bioresour. Bioprocess. 2017. Vol. 4. P.1-19 <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
19. Долінський А., Коник А., Радченко Н., Целень Б., Гоженко Л. Перспективність та розвиток апаратури принцип роботи заснований на механізмах дискретно-імпульсного підведення енергії. Теплофізика і теплоенергетика. 2017. 39(5). С.7-11 <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01>
20. Гоженко Л., Іваницький Г., Лимарь А., Ободович А., Радченко Н., Сидоренко В., Целень Б. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологіях підготовки води. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1 (sua19-01). С. 47–62 <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008>
21. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. Acta Periodica Technologica. 2022. №53. С. 123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
22. Dolinskiy A.A., Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. Specifics of Processing Pastes in Rotary-Pulse Equipment. Industrial Heat Engineering. 2001. 3. №3-4. P. 12-16
23. Долінський А.А., Басок Б.І. Дискретно-імпульсна трансформація енергії в адиабатно закипаючому потоці. Промислова теплотехніка. 2001. №4-5. С. 5-20

24. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
25. Целень Б., Ободович О., Недбайло А., Гоженко Л., Радченко Н. Оптимізація процесу водопідготовки для відновлення соків за допомогою гідродинамічної кавітації. *Продовольчі ресурси*. 2024. Т. 12. №23. С. 189-198 <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22>
26. Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н. Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. *Наукові праці*. Т.86(1). С. 11-16 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2396>
27. Ободович О., Целень Б., Саблій Л., Радченко Н., Недбайло А. Сучасні технології водопідготовки для теплоенергетики. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2025. Т. 47. №1. С. 80-88 <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/618/539>
28. Ivanytskyi G., Tselen B., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. *Physics of aerodisperse systems*. 2023. №61. P. 227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
29. Chen J., Bian Y., Wu Z., Li X., Wang T., Lv G. Accumulation Rule of Sugar Content in Corn Stalk, Plants. 2023. 12(6). P. 1373. <https://doi.org/10.3390/plants12061373>
30. Shukla A., Kumar D., Girdhar M., Kumar A., Goyal A., Malik T., Mohan A. Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2023. №16. P. 1-33 <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>

DISCRETE-PULSE ENERGY INPUT AS ALTERNATIVE METHOD OF STEAM EXPLOSION FOR PROCESSING LIGNIN-CONTAINING RAW MATERIALS INTO BIOFUELS

Obodovych O.¹, Ivanytskyi G.², Tselen B.³,
Radchenko N.⁴, Gozhenko L.⁵,

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Dr of Sc., Engineering, Head of Department, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteiskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, D.Sc., Professor Department of Machines and Apparatuses for Chemical and Oil Refining Industries; Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Dr of Sc, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>*

³*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Leading researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>*

⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.4>

The article analyzes the current trends in the transition of biofuel production from the first generation to the second, when the main raw material is inefficient or unsuitable for industrial needs, as well as technologies and possible ways to increase their efficiency. The preliminary processing of raw materials before their enzymatic hydrolysis and fermentation has been identified as promising. Methods applied at this technological stage of production, their disadvantages, and the conditions for their further successful implementation have been analyzed. The steam explosion method was identified as the most perspective. It was also found that the main limiting factor for its further industrial implementation is the complexity of designing equipment capable of ensuring the nearly instantly removal of the

product obtained after the steam explosion. Therefore, as an alternative, a method of discrete-pulse energy input, which is simpler to implement, has been proposed, the fundamental principles of which are incorporated into the operation of a rotor-pulsation apparatus. The structural features and operating principles of the proposed apparatus are described in detail, and it is demonstrated that the effects produced cannot be replicated using the steam explosion method, even with an increase in specific energy consumption. By comparing the proposed method with the steam explosion method, it established that the use of a rotor-pulsation apparatus increases the conversion degree by 1.2 to 1.7 times compared to steam explosion on the example of straw processing. The obtained results confirm the feasibility and appropriateness of using the discrete-pulse energy input method and rotor-pulsation apparatuses based on it for the pretreatment of lignocellulosic raw materials (e.g., corn stalks) prior to hydrolysis. In the future, the proposed equipment can be utilized in technologies for producing second-generation biofuels.

References 30, figures 1;

Key words: steam explosion, lignin-containing raw material, conversion rate, rotor-pulsation apparatus, discrete-pulse energy input, biofuel.

1. L. Zhao, Z. Sun, C. Zhang, J. Nan, N. Ren, D. Lee, C. Chen. Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives Bioresource Technology. 2022. Vol. 343. P. 126123 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126123>

2. L. Zhao, X. Zhang, J. Xu, X. Ou, S. Chang, M. Wu. Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic biomass in china: dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover. Energies. 2015. 8(5). P. 4096-4117 <https://doi.org/10.3390/en8054096>

3. Shulga S. M., Tigunova O. O., Blume Y. B. Lihnotseliuloza yak alternatyvna syrovyna dlia otrymannia biobutanolu. [Lignocellulose as an alternative source for obtaining of butanol]. Biotekhnolohiia [Biotechnol. acta.] 2013. 6 (2). P. 9–21 <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000037729> (In Ukr.)

4. E. Ximenes, C. Farinas, Y. Kim, M. Ladisch. Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production. Hydrothermal Processing in Biorefineries. 2017. P. 181-205 https://doi.org/10.1007/978-3-319-56457-9_7

5. P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, M.J. Negro pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review Bioresource Technology. 2010. Vol. 101(13). 2010. P. 4851-4861 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>

6. N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y. Lee, M. Holtzapple, M. Ladisch Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass Bioresource Technology 2005. Vol. 96(6). P. 673-686 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
7. V. Balan, B. Bals, S. Chundawat, D. Marshall, B. Dale. Lignocellulosic biomass pretreatment using AFEX Methods Mol Biol. 2009. Vol.581. 61-77 https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8_5
8. R. Ravindran, A. Jaiswal A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste: Challenges and Opportunities. Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 92-102 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106>
9. T. Scapini, M. Santos, C. Bonatto, j. Wancura, J. Mulinari, A. Camargo, N. Klanovicz, G. Zabet, M. Tres, G. Fongaro, H. Treichel Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. Bioresource Technology. 2021.Vol. 342. P. 126033 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033>
10. M. Yiasmin, A. Waleed, X. Hua. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass and by-products for lignocellulolytic enzymes modification: a review. International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2021. Vol. 7(1). P. 102-143 <https://doi.org/10.51193/IJAER.2021.7108>
11. O. Tigunova, N. Baiko, D. Kamenensky, Tkachenko, V. Evdokimenko, V. Kashkovsky, S. Shulga Lignocellulosica biomassa post explosivum autohydrolysis ut substratum ad obtinendum butanolum [Lignocellulosic biomass after explosive autohydrolysis as substrate to butanol obtaining] «Biotechnologia Acta». 2016. Vol. 9(4). P. 28-34 <https://doi.org/10.15407/biotech9.04.028> (In Ukr.)
12. T. Pielhop, J. Amgarten, M. Studer & Philipp Rudolf von Rohr. Pilot-scale steam explosion pretreatment with 2-naphthol to overcome high softwood recalcitrance Biotechnology for Biofuels. 2017. 10(130). P. 1-13 <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0816-y>
13. Gravitis, Ya.A. (1987). Theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of plant biomass. Wood Chemistry. (5). 321
14. Raushenberg N. Dhara K., Palmer J., Glasser W. Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic resources – structure and properties. American chemical society polymer preprints, division of polymer chemistry. 1990. Vol. 31(1). P. 650-652 <https://palmoilis.mpob.gov.my/publications/OPB/opb39-jalani.pdf>
15. Jacquet, N., et al. Influence of steam explosion on physicochemical properties and hydrolysis rate of lignocellulosic biomass. Bioresources. 2015. 10(3). P. 4611–4627 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.073>
16. Pielhop T., Amgarten J., von Rohr, P.R. et al. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. Biotechnol Biofuels. 2016. 9. 152 P. 1-13 <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1>
17. I. Ziegler-Devin, L. Chrusciel, N. Brosse. Steam Explosion Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Frontiers in Chemistry. 2021. 9. P.705358 <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705358>
18. A. Kumar, S. Sharma. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review Bioresour. Bioprocess. 2017. Vol. 4. P. 1-18 <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
19. A. Dolinskiy, A. Konyk, N. Radchenko, B. Tselen, L. Gozhenko Perspektivnist ta napriamky rozvytku apparativ, pryntsyyp roboty yakykh gruntuetsia na mekhanizmaxh dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii. [Perspectiveness and development of apparatus the principle of work is based on the mechanisms of discrete-pulse energy input]. Thermophysics and thermal power engineering. 2017. 39(5). P.7-11 <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01> (In Ukr.)
20. L. Gozhenko, H. Ivanytskyi, A. Lymar, V. Sydorenko, B. Tselen., N. Radchenko O. Obodovych (2021). Dyskretno-impulsne vvedennia enerhii v tekhnolohiiakh pidhotovky vody. [Discrete-pulsed energy input in water treatment technology]. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1 (sua19-01). P. 47–62 <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008> (in Ukr.)
21. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. Acta Periodica Technologica. 2022. №53. P. 123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
22. Dolinskiy A.A., Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. Specifics of Processing Pastes in Rotary-Pulse Equipment. Industrial Heat Engineering. 2001. 3. №3-4. P. 12-16
23. Dolinskiy A.A., Basok B.I. Dyskretno-impulsna transformatsiia enerhii v adiabatno zakypaiuchomu pototsi. [Discrete-pulse energy transformation in an adiabatically boiling flow]. Promyslova teplotekhnika. [Industrial Heat Engineering]. 2001. №4-5. P. 5-20 (in Ukr.)
24. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25, P. 215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
25. Tselen B., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Optyimizatsiia protsesu vodopidhotovky dlia vidnovlennia sokiv za dopomohoiu hidrodinamichnoi kavitatsii. [Optimization of the water treatment process for juice recovery using hydrodynamic cavitation] Prodovolchi resursy. [Food resources] 2024. Vol. 12(23) P. 189-198 <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22> (in Ukr.)

26. *Ivanytskyi G., Tselen B., Radchenko N.* Viktoristannya gidrodinamichnoyi kavitaciyi dlya pidvishennya efektyvnosti procesukristalizaciyi laktozi v molochnij sirovatci [Use of hydrodynamic cavitation to increase the efficiency of the lactose crystallization process in milky whey]. *Naukovi praci. [Scientific Works]* V.86(1). P. 11-16 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2396> (In Ukr.)
27. *Obodovych O., Tselen B., Sabliy L., Radchenko N., Nedbailo A.* Suchasni tehnologiyi vodopidgotovki dlya teploenergetiki [Modern water treatment technologies for thermal power engineering]. *Teplofizika ta teploenergetika [Thermophysics and Thermal Power Engineering]* 2025. Vol. 47(1). P. 80-88 <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/618/539> (In Ukr.)
28. *Ivanytskyi G., Tselen B., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N.* Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. *Physics of aerodisperse systems.* 2023. №61. P. 227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
29. *Chen J., Bian Y., Wu Z., Li X., Wang T., Lv G.* Accumulation Rule of Sugar Content in Corn Stalk, *Plants.* 2023. 12(6), P. 1373. <https://doi.org/10.3390/plants12061373>
30. *Shukla A., Kumar D., Girdhar M., Kumar A., Goyal A., Malik T., Mohan A.* Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts.* 2023. №16. P. 1-33 <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>

Отримано 28.06.2025

Received 28.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025

Accepted for publication 05.08.2025