

УДК 633.728; 633.63; 664.292; 664.123; 664.2.03

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ТЕПЛОМАСООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ БУРЯКОВОГО ЖОМУ В ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ПЕКТИНОВІСНІ ПРОДУКТИ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Целень Б.Я.², к.т.н., Іваницький Г.К.³, д.т.н., Хоменко В.О.⁴,
Переяславцева О.М.⁵, 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, orcid.org/0000-0001-7213-3118

²Інститут 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: b0d@ukr.net, orcid.org/0000-0001-5213-0219

³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: gergey4@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0486-2359

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, головний конструктор відділу тепломасообміну в дисперсних системах, e-mail: xbo1959@gmail.com, orcid.org/0009-0003-1073-1659

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., доц., e-mail: tdsittf@ukr.net, orcid.org/0009-0007-1922-5612

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.4>

В статті проаналізовані існуючі технології та обладнання для комплексної переробки бурякового жому в паливно-енергетичні та пектиновмісні продукти, встановлені їх переваги та недоліки. З метою оптимізації процесу отримання пектину з бурякового жому рекомендовано застосовувати тепломасообмінне обладнання, що працює з використанням принципу дискретно-імпульсного введення енергії (далі – ДІВЕ). Запропонований метод гідролізу целюлози з застосуванням тепломасообмінної установки роторного типу дає можливість збільшення передбачуваного виходу глюкози до 98-100 %.

The article analyzes existing technologies and equipment for the complex processing of sugar beet pulp into fuel and energy and pectin-containing products, establishes their advantages and disadvantages. In order to optimize the process of obtaining pectin from sugar beet pulp, heat and mass exchange equipment operating on the principle of discrete-pulse energy input (DPEI) is recommended. The proposed method of cellulose hydrolysis using a rotor-type heat and mass exchange unit makes it possible to increase the expected glucose yield to 98-100 %.

Бібліографія 30, рис. 2.

Ключові слова: біопродукти, пектин, лігноцелюлозна біомаса, геміцелюлоза, біостанол, гідродинамічні пристрої.

Вступ. В світі з кожним роком збільшується щорічне виробництво відходів рослинної сировини з яких тільки 2-3 % використовується в промисловості, а мільйони тон сільськогосподарських відходів щорічно залишаються невикористаними.

Відходи та побічні продукти промислової переробки і сільськогосподарської діяльності є потенційною відновлювальною сировиною. В останні десятиріччя екологічні проблеми, пов'язані з викопним паливом, викликали зміну парадигми, коли біомаса розглядається як сучасний та стійкий аналог викопного паливу. Перехід від економіки викопного палива до економіки, що

базується на біотехнології, пов'язаний з багатьма проблемами, зокрема, більш ефективним та стійким використанням відновлювальної біомаси [1]. Біопродукти можуть бути отримані з рослинної сировини, що використовується для харчування людини – сировина першого покоління: крохмаль (кукурудза та пшениця), цукор (цукровий буряк) та маслянисті культури (соняшник, ріпак). Проте, зростання населення призводить до зростання попиту на продукти та використання їх для виробництва біопродуктів, що може поставити під загрозу продовольчу безпеку в найближчому майбутньому, якщо тільки вони не виробляються з непродовольчих культур.

Використання лігноцелюлозних рослинних залишків (солома злакових культур) та залишків промислових процесів (буряковий жом) для виробництва біопродуктів просувалось протягом останнього десятиліття. Проте, перетворення лігноцелюлозної біомаси в цінні продукти пов'язане з багатьма технологічними обмеженнями, що значно відстає від технології переробки сировини першого покоління. Такі відходи та побічні продукти багаті целюлозою та геміцелюлозою, які можуть бути додатково перероблені в різні кінцеві продукти.

Серед переробних галузей агропромислового комплексу найбільш матеріалоемним виробництвом є цукрове виробництво, в якому використовується об'єм сировини і допоміжних матеріалів у декілька разів перевищує вихід готової продукції. Буряково-цукрова промисловість є стратегічною галуззю економіки в багатьох країнах і займає значне місце в структурі агропромислового комплексу України, так як забезпечує населення цінним продуктом харчування – цукром, який використовується в щоденному раціоні харчування людини.

В буряково-цукровій промисловості, у відповідності з існуючою номенклатурою та класифікацією вторинних матеріальних ресурсів, в результаті фізико-хімічної переробки цукрового буряка отримують різні види побічних продуктів – відходів, що обумовлено особливостями перебігу технологічних процесів переробки сировини в готову продукцію, причому побічні продукти отримують на різних стадіях технологічної обробки сировини. Хімічний склад отриманих побічних продуктів дозволяє віднести їх до розряду цінних вторинних сировинних ресурсів, використання яких вирішує задачу зниження техногенного впливу виробництва підвищуючи ступінь його екологічності.

Первинним відходом цукрового буряку є гичка, а найбільш багатотонним видом відходів буряково-цукрового виробництва – буряковий жом. І тільки повна переробка отримуваних відходів дозволяє стати цукровому виробництву більш ефективним та рентабельним.

Мета роботи: вивчення хімічного складу буряково-го жому і аналіз існуючого обладнання для його переробки в пектин та паливний біоетанол для пропозиції нового тепломасообмінного обладнання і технології, що дозволяють збільшити вихід готової продукції, підвищити якість та знизити енергозатрати на її отримання.

Буряковий жом є одним з основних супутніх продуктів цукрового виробництва. У Європі виробляється близько 20 млн. т. на рік жому, при цьому його найбільш поширене використання відзначається

у годуванні сільськогосподарських тварин. Цінність жому обумовлена не тільки мікроелементним складом, але також наявністю пектинових речовин. Відповідно до літературних даних, жом містить наступні основні компоненти: 20-30 % целюлози, 15-20 % геміцелюлози, 20-30 % пектину та 10-15 % білка. Завдяки цьому складу отримання з бурякового жому таких високоцінних продуктів, як пектин та паливний біоетанол може бути актуальним в рамках економіки замкнутого циклу.

Пектин складається з 300-1000 сахаридних ланок, більша частина яких є полімери D-галактуронової кислоти. Промисловий пектин зазвичай використовується в якості технологічного ад'юванта в косметичній, пластмасовій та фармацевтичній промисловостях, в медицині при лікуванні раку, у сільському господарстві в якості абсорбента, в текстильній промисловості, а також в харчовій – в якості желуючого, стабілізуючого компонента або загусника. Він міститься, в основному, в яблучних вичавках і шкірці цитрусових, екстрагованих за низького рН і високої температури. Однак, в останні роки для отримання пектину використовувались інші агротехнічні вторинні продукти і відходи, такі як цукровий жом буряка [2]. Пектин цукрових буряків як натуральний емульгатор показав великий потенціал у харчовій та фармацевтичній областях. Однак, ефективність емульгування залежить від молекулярної структури пектину, яка тісно пов'язана з методом екстракції. Структурні характеристики бурякового пектину (ступінь метилювання, ступінь ацетилювання, ступінь блочності, молекулярна маса, вміст ферулової кислоти, вміст білка, нейтральні бічні ланцюги цукру і т. д.) мають велике значення для його емульгуючої активності та стабільності [3].

Процес добування пектинових речовин є досить складним і складається з двох взаємопов'язаних стадій: гідролізу протопектину та екстрагування пектину в розчин. Технології гідролізу-екстрагування пектину здійснюються при жорстких технологічних режимах з використанням хімічних технологій (кислотний гідроліз: концентрація соляної кислоти – 1,5 %, гідромодуль 1:15, температура 75-900 °C, тривалість 2-3 години). Процес характеризується низьким ступенем екстрагування і порушенням структури пектину, що є шкідливим і небезпечним. Крім того, відпрацьовані розчини мінеральних кислот та інших гідролізуючих агентів, побічні продукти і конденсати пари є потенційними джерелами забруднення навколишнього середовища.

Екологічно чистими і більш ефективними по виходу продукту можуть стати технології, в яких використовуються фізичні методи обробки пектиновмісної сирови-

ни. Зокрема, до них відносяться роторно-кавітаційний [4, 5], ежекторно-кавітаційний [6], метод заморожування з наступною дефростацією, ультразвукова обробка та інші – дія яких направлена на підвищення швидкості молекулярної дифузії пектину в розчин.

Одним з найбільш ефективних способів енергетичного впливу на технологічні процеси в рідинах є використання акустичних коливань ультразвукового діапазону. При цьому вплив здійснюється як ефектами першого порядку (частота, інтенсивність і швидкість коливань), так і ефектами другого порядку (кавітація, акустичні течії, пульсація парогазових бульбашок і т. д.).

Удосконалення та створення принципово нового ультразвукового обладнання великої потужності стало можливим у зв'язку зі створенням високоефективних п'єзокерамічних матеріалів [7, 8, 9].

Для проведення процесу гідролізу – екстрагування жому цукрових буряків з метою отримання пектину в ІТТФ НАН України на основі модифікації існуючого кавітаційного пульсатора [10, 11-13] створено принципово новий тип екстрактора пульсаційного типу, в якому вперше, для посилення кавітаційних ефектів, застосовано комбінований гідродинамічний пристрій до складу якого входить сопло Вентурі [15, 16]. Конструктивна схема цього апарата, яка показана на рис. 1 і принцип його роботи практично ті ж самі, як і у традиційного пульсатора з активною мембраною, описаного в роботах [10-12, 14], але з певною принциповою відмінністю.

Робоча камера 1 представляє собою короткий циліндр, верхня і нижня основи якого мають форму кульового сегмента. Через круглий отвір у верхній основі камера за допомогою горизонтальної труби 2, на якій встановлено сопло Вентурі 3, з'єднана з завантажувальною ємністю 4, що містить оброблювану рідинну суміш з заданою температурою, що знаходиться під атмосферним тиском. Отвір у нижній основі з'єднує робочу камеру з газовим трактом. Швидкодіючий електромагнітний клапан 5 дозволяє періодично через задані інтервали часу підключати камеру або до ресивера високого тиску (РВТ) 6, під'єданого до компресора, або до ресивера низького тиску (РНТ) 7, під'єданого до вакуумного насоса. У процесі екстрагування показники тиску в ресиверах підтримуються постійними в інтервалах значень $p_{comp} = 0,2 \div 0,4$ МПа і $p_{vac} = 0,001 \div 0,003$ МПа відповідно. Тиск в ресиверах p_{comp} і p_{vac} так само з тривалістю підключення кожного ресивера до робочої камери τ_{comp} і τ_{vac} є режимними параметрами установки. У центрі робочої камери розташована, виготовлена з міцної гуми, діафрагма, що жорстко з'єднана по довжині кола з бічною поверхнею камери. Під дією тиску центральна частина діафрагми щільно прилягає позмінно до верхньої або нижньої основи, перекриваючи, відповідно, верхній або нижній отвір камери. На стадії підключення камери до РВТ діафрагма переміщується до верхньої основи, інтенсивно виштовхуючи рідину з камери по трубі через сопло Вентурі

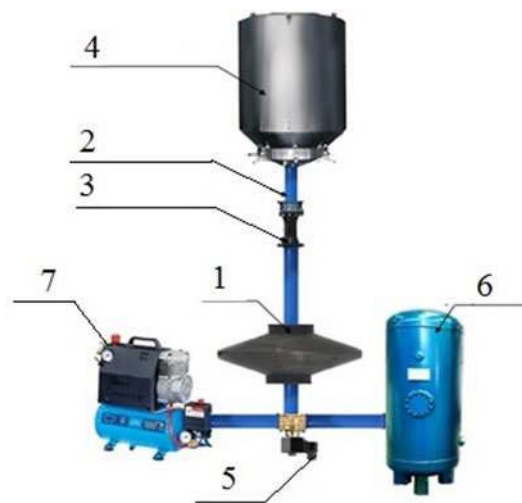


Рис. 1. Схема пульсаційного екстрактора з комбінованим гідродинамічним пристроєм:

1 – робоча камера; 2 – труба; 3 – сопло Вентурі; 4 – завантажувальна ємність; 5 – електромагнітний клапан; 6 – ресивер високого тиску(РВТ); 7 – ресивер низького тиску (РНТ)

Fig. 1. Scheme of a pulsation extractor with a combined hydrodynamic device: 1 – working chamber; 2 – tube; 3 – Venturi nozzle; 4 – loading tank; 5 – solenoid valve; 6 – high pressure receiver (HPR); 7 – low pressure receiver (LPR)

до завантажувальної ємності. До моменту перекриття верхнього отвору швидкість течії набуває значення порядку 10 м/с, і рідина рухається вгору по трубі без контакту з діафрагмою.

Після відриву рідини від діафрагми утворюється порожнина з безперервно зростаючим об'ємом, що поступово заповнюється парою. Через швидкісний рух стовпа рідини тиск пари всередині порожнини суттєво нижчий за тиск насиченої пари $p_{sat}(T_l)$. Тиск в рідині на межі з порожниною миттєво знижується від величини $p_{comp} \cong 0,3 \text{ МПа}$ до $p_l < p_{sat}(T_l) \cong 0,002 \text{ МПа}$, що призводить до закипання рідини поблизу вільної поверхні. Через різницю тисків $p_a - p_{sat}(T_l)$ і дію сил тертя об стінку рідина в трубі швидко гальмує і потім, змінюючи напрям, рухається зі зростаючою швидкістю у напрямку камери, доки не досягне вхідного отвору в камеру. Якщо до цього моменту камера під'єднана до РВТ, то вхід в камеру перекритий, і рідина в трубі одразу зупиняється. Якщо ж камера через електромагнітний клапан вже з'єднана з РНТ, то рідина з труби швидко заповнює камеру і зупиняється на діафрагмі, що прилягає до нижньої основи. В обох випадках миттєва зупинка потоку ініціює явище гідравлічного удару. При наступному під'єднанні камери з РВТ цикл повторюється. Частота повторень циклу, в залежності від заданого режиму повторень циклу, становить 0,5-1,5 Гц.

Ефективність використання розробленого обладнання при проведенні процесу гідролізу – екстрагування пектину з бурякового жому полягає в створенні більшої кількості рівномірно розподілених в дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в просторі і часі. Супроводжуючі ці явища ударні хвилі, міжфазна турбулентність, мікрокавітація, проникаючі кумулятивні мікрострумені, вихори викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного подрібнення дисперсних включень, значному збільшенню сумарної поверхні контакту фаз та підвищенню процесів тепломасоперенесення. Подібні ефекти недосяжні при використанні інших методів навіть при значно більшому рівні енергозатрат. Запропоноване обладнання дозволяє максимально вилучити пектин з бурякового жому. Разом з пектином з жому видаляються небажані супутні речовини (лігнін та геміцелюлоза) і залишається практично одна целюлоза, вміст якої становить 95-97 %. Даний продукт є цінною сировиною для отримання паливного біоетанолу другого покоління. Першим етапом отримання паливного

біоетанолу з целюлози, що міститься в жомі, є кислотно-контактний гідроліз.

Традиційні технології кислотного-каталітичного гідролізу недостатньо ефективні через низьку якість одержуваних глюкозних гідролізатів, забруднених домішками, які інгібують ферментацію глюкози в біоетанол і знижують його вихід. До інгібуючих домішок відносяться фуранові сполуки, феноли, терпени, таніни, мурашина та левулінова кислоти, високомолекулярні сполуки лігногумінового типу [17]. В даний час вживаються зусилля, спрямовані на біотрансформацію інгібуючих речовин у гідролізатах шляхом метаболізму специфічними дріжджами. Проте, технологія таких процесів складніша, ніж традиційних процесів ферментації [18]. Склад та вміст інгібіторів дріжджової ферментації глюкози в біоетанол визначаються природою вихідної сировини та умовами її кислотного гідролізу.

Для отримання гідролізатів з високим вмістом глюкози та зниженою концентрацією небажаних домішок доцільно використовувати гідроліз целюлози, що міститься в буряковому жомі.

Традиційними каталізаторами кислотних перетворень целюлози є мінеральні кислоти H_2SO_4 , HCl . Описані в сучасній літературі [19-21] методи гідролізу рослинної сировини розбавленими мінеральними кислотами за підвищених температур не дозволяють отримувати з рослинної сировини моносахаридів з високим виходом. У роботі проведено оптимізацію процесу гідролізу мехактивованої мікрокристалічної целюлози в присутності сірчанокислотного каталізатора (0,5-2,5 % мас. H_2SO_4) при температурі 150 °С та тривалості 0,5–3,0 год. Розрахунковими методами встановлено, що оптимальні показники досягаються при вмісті сірчанокислотного каталізатора 2,5% мас. та тривалості процесу 1,76 год. В таких умовах прогнозований вихід глюкози становить 65,15 % мас. Для підвищення виходу глюкози запропоновано застосовувати концентровані кислоти для гідролізу целюлози [22, 23]. У роботі [24] вивчений двостадійний гідроліз бавовняної целюлози, Avisel та лігноцелюлози верби 72 % H_2SO_4 при рідинному модулі 11 з наступним 4-кратним розбавленням гідролізату. При цьому вихід глюкози становив близько 90 %.

У роботі вивчено вплив умов гідролізу мікрокристалічної целюлози 80 % сірчаною кислотою (температури, рідинного модуля, тривалості) на ступінь конверсії целюлози та на вихід глюкози. Розрахунковими методами проведено оптимізацію процесу гідролізу МКЦ і встановлено, що при температурі 25 °С,

тривалості гідролізу 47 хв. і рідинному модулі 1,4 прогнозований вихід глюкози становитиме близько 100 %.

У гідролізаті, отриманому в умовах, близьких до оптимальних, вихід глюкози становить 98,7 % мас., а вміст у ньому інгібіторів 5 ферментативних процесів (фурфуролу, 5-ГМФ та левулінової кислоти) істотно нижчий від допустимих значень.

У гідролізаті, отриманому в умовах, близьких до оптимальних, вихід глюкози становить 98,7 % мас., а вміст у ньому інгібіторів 5 ферментативних процесів (фурфуролу, 5-ГМФ та левулінової кислоти) істотно нижчий від допустимих значень.

Основна перевага використання концентрованої сірчаної кислоти в гідролізі целюлози, порівняно з її розбавленими розчинами, полягає у досягненні вищого виходу моносахаридів при кімнатній температурі та атмосферному тиску при знижених енерговитратах. Стимулюючим фактором широкого використання концентрованої кислоти в гідролізі целюлози є складність процесу її регенерації для повторного використання. Найбільш важливими компонентами гідролізатів є гексози, що зброджуються в ета-

нол. Пентози не засвоюються основним комерційним штамом спиртоутворюючих дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*, який застосовується у промисловому одержанні етанолу [3, 25]. Розчинні олігосахариди, які також присутні в гідролізатах, не засвоюються ферментами, хоча і не є інгібіторами біохімічних процесів. Для підвищення виходу біоетанолу необхідно провести інверсію гідролізатів і підвищити вихід засвоюваних моносахаридів [26].

Завданням комплексної переробки буряково-цукрового жому було не лише розроблення обладнання і технології отримання пектину, але і якісних гідролізатів з целюлозної сировини для ферментативного синтезу біоетанолу, заснованих на інтеграції каталітичних процесів кислотного гідролізу і тепломасообмінного обладнання, що працює за принципом ДІВЕ на межі розділу фаз в рідких гетерогенних системах [27].

На рис. 2 представлена технологічна схема експериментальної тепломасообмінної установки роторного типу.

Приймальна ємність 1 об'ємом 50 л призначена для розміщення суміші сировини та кислотного розчину

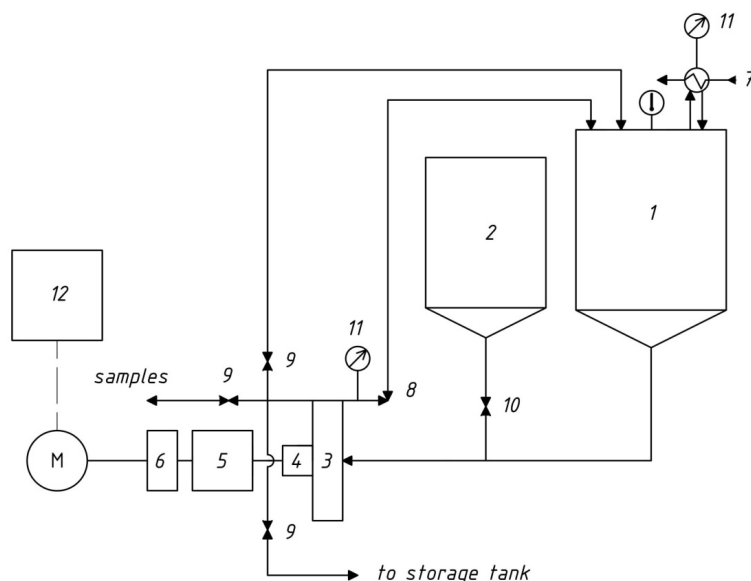


Рис. 2. Технологічна схема експериментальної тепломасообмінної установки роторного типу:

1 – приймальна ємність; 2 – ємність для сировини; 3 – РПА; 4 – вузол ущільнення;

5 – підшипниковий вузол; 6 – муфта; 7 – дефлегматор; 8 – кульовий кран кутовий; 9 – кульовий кран ½'';

10 – кульовий кран 1''; 11 – манометр; 12 – блок управління

Fig. 2. Technological diagram of the pilot plant for discrete-pulse energy input: 1 – receiving tank;

2 – raw material container; 3 – rotor-pulsation apparatus; 4 – stuffing box assembly; 5 – console with bearing

mounds; 6 – coupling; 7 – deflegmator; 8 – angle ball valve; 9 – ½" ball valve; 10 – 1" ball valve;

11 – manometer; 12 – control unit

протягом обробки. Ємність 1 через вихідний патрубок з'єднується з входом в роторно-пульсаційний апарат (далі – РПА). Ємність 2 призначена для завантаження жому буряка та подачі його в РПА через трубопровід, що поєднує ємність 1 та ємність 2 з РПА. Швидкість подачі вихідної сировини з ємності 2 регулюється кульовим краном 10. РПА 3 призначений для обробки суміші жому з кислотним розчином. РПА одночасно виконує функцію відцентрового насоса. Дефлегматор 11 призначений для запобігання зміни співвідношення компонентів кислотного розчину протягом обробки. Блок керування 12 є окремим стаціонарним блоком з якого відбувається дистанційне керування установкою. Блок оснащений вхідним автоматом, частотним перетворювачем ОВЕН, амперметром, лічильником електроенергії. До вихідного патрубка РПА для визначення напору під'єднаний манометр 11. Мінімальний об'єм суміші для обробки в установці становить 10 л.

Принцип роботи установки полягає в наступному.

Гідроліз целюлози, що міститься в жомі буряка відбувається наступним чином. Приймальна ємність 1 та РПА заповнюються кислотним розчином, який є гідролізуючою рідиною. Буряковий жом завантажують в ємність для сировини 2. Вода на охолодження з мережі водопостачання подається до дефлегматора 7. Кульові крани 8, 9, 10 встановлюються в положення, за якого суспензія жому буряка та кислотного розчину циркулює по замкнутому контуру. Частоту обертання електродвигуна встановлюють заздалегідь частотним перетворювачем. Установка працює в режимі рециркуляції.

При проходженні суміші через робочі органи РПА (ротор, статор) [28], суміш піддається впливу ударних хвиль, міжфазної турбулентності, кумулятивних мікроструменів та вихорів, що призводить до інтенсивного подрібнення частин жому, значному збільшенню поверхні контакту фаз і підвищенню процесів тепломасоперенесення. В результаті цього впливу при обробці суміші в РПА відбуваються одночасно процеси диспергування, перемішування, розчинення, нагрівання та гідролізу. Кількість циклів рециркуляції, гідромодуль та вміст кислоти в розчині визначаються експериментальним шляхом.

Порівнюючи запропонований метод гідролізу целюлози з наведеними раніше, можна зробити висновок, що проведення кислотного гідролізу целюлози з застосуванням тепломасообмінної установки роторного типу може інтенсифікувати процес щодо зменшення тривалості, зниження температури, зменшення концентрації кислоти та збільшення передбачуваного виходу глюкози до 98-100 %. Це дає можливість підвищити вихід біоетанолу та знизити енергозатрати на його виробництво.

Висновки.

Найбільш багатотоннажним, малозатребуваним, швидкопсувним продуктом переробки цукрового буряка є жом, кількість якого становить до 80 %. Разом з тим, жом містить від 20 до 30 % пектину і таку ж кількість целюлози, які можуть бути використані для виробництва паливного біоетанолу та пектиновмісних продуктів харчування профілактичного значення. Встановлено, що на першому етапі переробки жому вилучають пектин. Для цього проаналізовані існуючі технології та обладнання, встановлені їх переваги та недоліки. З метою оптимізації процесу отримання пектину з бурякового жому, рекомендовано тепломасообмінне обладнання, що працює за принципом ДІВЕ.

Жом, після видалення пектину, містить до 95-97 % целюлози і практично не містить небажаних супутніх речовин (лігнін, геміцелюлоза). В такому вигляді жом є цінною сировиною для отримання паливного біоетанолу. Першим етапом виробництва паливного біоетанолу є гідроліз целюлози з утворенням глюкози.

Вивчені та проаналізовані існуючі технології та обладнання для проведення процесу гідролізу целюлози. Встановлені їх переваги та недоліки. На підставі цього, для оптимізації процесу запропонована тепломасообмінна установка роторного типу, яка може дати можливість скоротити тривалість перебігу процесу, знизити температурні показники, зменшити концентрацію кислоти та збільшити вихід глюкози до 98-100 %. Це підвищить вихід біоетанолу та знизить енергозатрати на його виробництво.

ЛІТЕРАТУРА

1. Camara-Salim I., Conde P., Feijoo G., Moreira M.T. The use of maize stover and sugar beet pulp as feedstocks in industrial fermentation plants – An economic and environmental perspective. *Cleaner Environmental Systems*. 2021. V.2. P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100005>
2. Грабишин А.С. О некоторых особенностях технологий производства пектина. *Новые технологии*. 2010. № 2. С. 30-34.
3. Niu H., Hou K., Chen H., Fu X. A review of sugar beet pectin stabilized emulsion: extraction, structure, interfacial self-assembly and emulsion stability. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*. 2024. V. 64. № 3. P. 852-872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2109586>

4. Голубев В.Н., Губанов С.Н., Микеладзе О.Г. Роторно-кавитационный аппарат для обработки пектино-содержащего сырья. Пищевая промышленность. 1990. № 9. С. 30-32.
5. Голубев В.Н., Гаджиева А.А., Кожухарь В.В. Корчиева Г.М. Гидроакустические аппараты при переработке растительного сырья. Пищевая промышленность. 1992. № 7. С. 11-12.
6. Шаззо Р.И., Богус А.М., Запорожец Е.П. Экстрагирование пектина в гидродинамическом аппарате. Хранение и переработка сельхозсырья. 1996. № 1. С. 13-14.
7. Прилипко Ю.С., Салей В.С., Черный В.И., Кулик И.А. Критерии выбора пьезокерамики для источников мощного ультразвука. Наукові праці Донецького НТУ. Серія хімія і хімічна технологія. 2001. Вип. 33. С. 86-92.
8. Прилипко Ю.С., Салей В.С., Пилипенко Н.П. Изучение влияния некоторых физических воздействий на технологические параметры получения пьезоматериалов и электрические свойства пьезокерамики. Наукові праці Донецького НТУ. Серія хімія і хімічна технологія. 2002. Вип. 44. С. 110-119.
9. Салей В.С., Прилипко Ю.С., Пилипенко Н.П., Константинова Т.Е. Влияние обработки ЦТС-порошков ультразвуком, СВЧ излучением и высоким гидростатическим давлением на свойства пьезокерамики. Физика и техника высоких давлений. 2002. Том. 12. № 2. С. 46-51.
10. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums. *Acta Periodica Technologica*. 2024. Issue 55. P. 215-223. <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>
11. Чайка О.І., Гоженко Л.П., Іваницький Г.К., Корінчук Д.М. Інтенсифікація диспергування низинного торфу із застосуванням пульсаційного диспергатора. Пром. Теплотехніка. 2013. № 35 (5). 20-26.
12. Іваницький Г.К., Корчинський А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. Пром. теплотехника. 2003. Т. 25, № 1. С.29–34.
13. Іваницький Г.К., Гоженко Л.П. Аналитическое исследование условий возникновения кавитации в трубе пульсационного диспергатора ударного типа. Пром. теплотехника. 2014. Т. 36, № 6. С. 49-56.
14. Іваницький Г.К. Численное исследование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. Наукові праці ОНАХТ. 2017. Т. 81, Вип. 1. С. 114-120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.686>
15. Obodovych O., Ivanitsky G., Gozhenko L., Tselen B., Nedbailo A. Analytical studies of the initiation of cavitation effects in the pulsation extractor with the combined hydrodynamic device. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2025. 47(1). 41-48. Retrieved from <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/614>
16. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B., Radchenko N., Gozhenko L., Shchepkin V. Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic cavitation reactor for preparation of coal water fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. 45(1). 28-34. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.4>
17. Almeida J.R.M., Modig T., Petersson A., Hähn-Hägerdal B., Lidén G., Gorwa-Grauslund M.F. Increased tolerance and conversion of inhibitors in lignocellulosic hydrolysates by *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2007. 82. 340-349. <https://doi.org/10.1002/jctb.1676>
18. Lin Y., Tanaka S. Ethanol Fermentation from Biomass Resources: Current State and Prospects. *Appl. Microbial. Biotechnol.* 2006. V. 69. P. 627-642. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>
19. Yang Z., Kang H., Guo Y., Zhuang G. Dilute-acid conversion of cotton straw to sugars and levulinic acid via 2-stage hydrolysis. *Industrial Crops and Products*. 2013. V. 46. P. 205-209. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.031>
20. Zhao X., Zhou Y., Liu D. Kinetic model for glycan hydrolysis and formation of monosaccharides during dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*. 2012. V. 105. P. 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.075>
21. Bujang N., Rodhi M.N.M., Musa M., Subari F. Effect of Dilute Sulfuric Acid Hydrolysis of Coconut Dregs on Chemical and Thermal Properties. *Procedia Engineering*. 2013. V. 68. P. 372-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.194>
22. Shin S-J, Park J-M, Cho DH, Kim YH, Cho N-S. Acid hydrolysis characteristics of Yellow poplar for high concentration of monasaccharides production. *J. Korean. Wood Sci. Technol.* 2009. V. 37. P. 578-584.
23. Iranmahboob J, Nadim F, Monemi S. Optimizing acid-hydrolysis: A critical step for production of ethanol from mixed wood chips. *Biomass and Bioenergy*. 2002. V. 22. N 5. P. 401-404. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00016-8)
24. Yoon S.-Y., Han S.-H., Shin S.-J. The effect of hemicelluloses and lignin on acid hydrolysis of cellulose. *Energy*. 2014. V. 77. P. 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.104>

25. *Jeffries T.* Engineering yeasts for xylose metabolism. *Curr. Opin. Biotech.* 2006. V. 17. N 3. P. 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2006.05.008>

26. *Wijaya Y., Putra R., Wijaya V., Ha J.-M., Suh D., Kim C.S.* Comparative study on two-step concentrated acid hydrolysis for the extraction of sugars from lignocellulosic biomass. *Bioresource technology.* 2014. V. 164. P. 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.084>

27. *Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А., Віровець А.П.* Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация: Монография. «Апостроф», 2012. 185 с.

28. *Накорчевский А.И., Басок Б.И. Рыжкова Т.С.* Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. *Инж.-физ. журн.* 2002. Т. 75, № 2. С. 58-68.

TECHNOLOGY AND HEAT-AND-MASS TRANSFER EQUIPMENT FOR THE INTEGRATED PROCESSING OF SUGAR BEET PULP INTO FUEL, ENERGY AND PECTIN-CONTAINING PRODUCTS

Obodovych O.M.¹, Tselen B.Ya.², Ivanytskyi G.K.³,
Khomenko V.O.⁴, Pereiaslavl'tseva O.M.⁵

¹Dr. Sci. (Engin.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, leading researcher, orcid.org/0000-0001-5213-0219

³National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine, D.Sc., professor; Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, D.Sc., leading researcher, orcid.org/0000-0002-0486-2359

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: xbo1959@gmail.com, orcid.org/0009-0003-1073-1659

⁵Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, Department of Heat and Mass Transfer in Dispersed Systems, Ph.D., Assoc. Prof., e-mail: tdsittf@ukr.net, orcid.org/0009-0007-1922-5612

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.4>

The article analyzes existing technologies and equipment for the complex processing of sugar beet pulp into fuel and energy and pectin-containing products, establishes their advantages and disadvantages. In order to optimize the process of obtaining pectin from sugar beet pulp, heat and mass exchange equipment operating on the principle of discrete-pulse energy input (DPEI) is recommended.

Sugar beet pulp is one of the main by-products of sugar production. In Europe, about 20 million tons of pulp are produced per year, and its most widespread use is in feeding farm animals. The value of the pulp is due not only to the microelement composition, but also to the presence of pectin substances. According to literature data, the pulp contains the following main components: 20-30 % cellulose,

15-20 % hemicellulose, 20-30 % pectin and 10-15 % protein. Due to this composition, obtaining such high-value products from beet pulp as pectin and fuel bioethanol may be relevant within the framework of a closed-loop economy.

The process of extracting pectin substances is quite complex and consists of two interrelated stages: hydrolysis of protopectin and extraction of pectin into a solution. Pectin hydrolysis-extraction technologies are carried out under strict technological conditions using chemical technologies (acid hydrolysis: hydrochloric acid concentration – 1.5 %, hydromodule 1:15, temperature 75-900 °C, duration of 2-3 hours). The process is characterized by a low degree of extraction and disruption of the pectin structure, which is harmful and dangerous. In addition, spent solutions of mineral acids and other hydrolyzing agents, by-products and steam condensates are potential sources of environmental pollution. To carry out the hydrolysis process – extraction of sugar beet pulp to obtain pectin at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine a fundamentally new type of pulsation-type extractor has been created, in which, for the first time, a combined hydrodynamic device, which includes a Venturi nozzle, has been applied for enhance cavitation effects.

In order to optimize the process of obtaining pectin from sugar beet pulp, heat and mass exchange equipment operating on the principle of discrete-pulse energy input (DPEI) is recommended. After the removal of pectin, the pulp contains up to 95-97 % cellulose and practically does not contain undesirable accompanying substances (lignin, hemicellulose). In this form, the pulp is a valuable raw material for obtaining fuel bioethanol.

References 30, fig. 2.

Key words: bioproducts, pectin, lignocellulosic biomass, hemicellulose, bioethanol, hydrodynamic devices.

1. Camara-Salim I., Conde P., Feijoo G., Moreira M.T. The use of maize stover and sugar beet pulp as feedstocks in industrial fermentation plants – An economic and environmental perspective. *Cleaner Environmental Systems*. 2021. V.2. P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100005>

2. Hrabysyn A.S. O nekotorykh osobennostyakh tekhnologii proizvodstva pektina [About some features of pectin production technologies]. *Novie tekhnologii* [New technologies]. 2010. No. 2. P. 30-34.

3. Niu H., Hou K., Chen H., Fu X. A review of sugar beet pectin stabilized emulsion: extraction, structure, interfacial self-assembly and emulsion stability. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition*. 2024. V. 64. № 3. P. 852-872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2109586>

4. Golubev V.N., Gubanov S.N., Mikeladze O.G. Rotorno-kavitatsionnii aparat dlya obrabotki pektinosoderzhashchego sirya [Rotary-cavitation apparatus for processing pectin-containing raw materials]. *Pishchevaya promishlennost* [Food industry]. 1990. No. 9. P. 30-32.
5. Golubev V.N., Gadzhieva A.A., Kozhuhar V.V. Korchieva G.M. Gidroakusticheskie apparati pri pererabotke rastitelnogo sirya [Hydroacoustic devices for the processing of vegetable raw materials]. *Pishchevaya promishlennost* [Food industry]. 1992. No. 7. P. 11-12.
6. Shazzo R.Y., Bogus A.M., Zaporozhets E.P. Ekstragivanie pektina v gidrodinamicheskom apparate [Extraction of pectin in a hydrodynamic apparatus]. *Khranenie i pererabotka selkhozsiroya* [Storage and processing of agricultural raw materials]. 1996. No. 1. P. 13-14.
7. Prilypko Yu.S., Salei V.S., Cherny V.I., Kulyk I.A. Kriterii vibora pezoeramiki dlya istochnikov moshchnogo ultrazvuka [Criteria for choosing piezoceramics for sources of powerful ultrasound]. *Naukovi pratsi Donetskogo NTU. Seriya khimiya i khimichna tekhnologiya* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Chemistry and chemical technology series]. 2001. Issue 33. P. 86-92.
8. Prylypko Yu.S., Salei V.S., Pylypenko N.P. Izuchenie vliyaniya nekotorykh fizicheskikh vozdествii na tekhnologicheskie parametri polucheniya pezomaterialov i elektricheskie svoystva pezoeramiki [Study of the influence of some physical effects on the technological parameters of production of piezomaterials and electrical properties of piezoceramics]. *Naukovi pratsi Donetskogo NTU. Seriya khimiya i khimichna tekhnologiya* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Chemistry and chemical technology series]. 2002. Issue 44. P. 110-119.
9. Salei V.S., Prilypko Yu.S., Pylypenko N.P., Konstantinova T.E. Vliyanie obrabotki TsTS-poroshkov ultrazvukom, SVCh izlucheniem i visokim gidrostaticheskim davleniem na svoystva pezoeramiki [Effect of treatment of TSS powders with ultrasound, microwave radiation and high hydrostatic pressure on the properties of piezoceramics]. *Fizika i tekhnika visokikh davlenii* [High pressure physics and technology]. 2002. Vol. 12. No. 2. P. 46-51.
10. Hozhenko L., Ivanitsky G., Tselen B., Radchenko N., Nedbailo A. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums. *Acta Periodica Technologica*. 2024. Issue 55. P. 215-223. <https://doi.org/10.2298/APT2455215H>
11. Chaika O. I., Gozhenko L. P., Ivanytskyi G. K., Korinchuk D.M. Intensifikatsiya disperguvannya nizinnogo torfu iz zastosuvannyam pulsatsiynogo dispergatora [Intensification of lowland peat dispersion using a pulsating disperser]. *Prom. teplotekhnika* [Prom. Thermotechnics]. 2013. No. 35 (5). P. 20-26.
12. Ivanytskyi G.K., Korchinsky A.A., Matyushkin M.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v pulsatsionnom dispergatore udarnogo tipa [Mathematical modeling of processes in a shock-type pulsation disperser]. *Prom. teplotekhnika* [Prom. heat engineering]. 2003. Vol. 25, No. 1. P. 29-34.
13. Ivanytsky G.K. Gozhenko L.P. Analiticheskoe issledovanie uslovii vozniknoveniya kavitatsii v trube pulsatsionnogo dispergatora udarnogo tipa [Analytical study of the conditions for the occurrence of cavitation in the pipe of a shock-type pulsating disperser]. *Prom. teplotekhnika* [Prom. heat engineering]. 2014. Vol. 36, No. 6. P. 49-56.
14. Ivanytskyi G.K. Chislennoe issledovanie povedeniya puzirkovogo klastera v protsessakh gidrodinamicheskoi kavitatsii [Numerical study of bubble cluster behavior in hydrodynamic cavitation processes]. *Naukovi pratsi ONAKhT* [Scientific works of ONAKHT]. –2017.–Vol.81, issue 1, P.114–120. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.686>
15. Obodovych O., Ivanitsky G., Gozhenko L., Tselen B., Nedbailo A. Analytical studies of the initiation of cavitation effects in the pulsation extractor with the combined hydrodynamic device. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2025. 47(1). 41-48. Retrieved from <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/614>
16. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B., Radchenko N., Gozhenko L., Shchepkin V. Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic cavitation reactor for preparation of coal water fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. 45(1). 28-34. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.4>
17. Almeida J.R.M., Modig T., Petersson A., Hähn-Hägerdal B., Lidén G., Gorwa-Grauslund M.F. Increased tolerance and conversion of inhibitors in lignocellulosic hydrolysates by *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2007. 82. P. 340-349. <https://doi.org/10.1002/jctb.1676>
18. Lin Y., Tanaka S. Ethanol Fermentation from Biomass Resources: Current State and Prospects. *Appl. Microbial. Biotechnol.* 2006. V. 69. P. 627-642. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>
19. Yang Z., Kang H., Guo Y., Zhuang G. Dilute-acid conversion of cotton straw to sugars and levulinic acid via 2-stage hydrolysis. *Industrial Crops and Products*. 2013. V. 46. P. 205-209. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.031>

20. Zhao X., Zhou Y., Liu D. Kinetic model for glycan hydrolysis and formation of monosaccharides during dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*. 2012. V. 105. P. 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.075>
21. Bujang N., Rodhi M.N.M., Musa M., Subari F. Effect of Dilute Sulfuric Acid Hydrolysis of Coconut Dregs on Chemical and Thermal Properties. *Procedia Engineering*. 2013. V. 68. P. 372-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.194>
22. Shin S-J, Park J-M, Cho DH, Kim YH, Cho N-S. Acid hydrolysis characteristics of Yellow poplar for high concentration of monasaccharides production. *J. Korean. Wood Sci. Technol*. 2009. V. 37. P. 578-584.
23. Iranmahboob J, Nadim F, Monemi S. Optimizing acid-hydrolysis: A critical step for production of ethanol from mixed wood chips. *Biomass and Bioenergy*. 2002. V. 22. N 5. P. 401-404. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00016-8)
24. Yoon S.-Y., Han S.-H., Shin S.-J. The effect of hemicelluloses and lignin on acid hydrolysis of cellulose. *Energy*. 2014. V. 77. P. 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.104>
25. Jeffries T. Engineering yeasts for xylose metabolism. *Curr. Opin. Biotech*. 2006. V. 17. N 3. P. 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2006.05.008>
26. Wijaya Y., Putra R., Wijaya V., Ha J.-M., Suh D., Kim C.S. Comparative study on two-step concentrated acid hydrolysis for the extraction of sugars from lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*. 2014. V. 164. P. 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.084>
27. Dolinsky A.A., Obodovych O.M., Borkhalenko Yu.A., Virovets A.P. Metod diskretno-impulsnogo vvoda energii i yego realizatsiya [The method of discrete-pulse energy input and its implementation]: Monografiya [Monograph]. «Apostrof» ["Apostrophe"]. 2012. - 185 p.
28. Nakorchevsky A.I., Basok B.I., Ryzhkova T.S. Gidrodinamika rotorno-pulsatsionnikh apparatov [Hydrodynamics of rotor-pulsation devices]. *Inzh.-fiz. zhurn.* [Engineer-Physics Journal]. 2002. Vol. 75, No. 2. P.58-68.

Отримано 28.06.2025

Received 28.06.2025

Прийнято до друку 04.11.2025

Accepted for publication 04.11.2025