

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ МЕТОДИ У ВИРОБНИЦТВІ ПЕКТИНОВІСНИХ ПРОДУКТІВ
З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Ободович О. М.¹, д.т.н., проф., завідувач відділом тепломасообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Гусятинська Н. А.², д.т.н., професор кафедри технології цукру і підготовки води
<https://orcid.org/0000-0001-9999-6650>

Степанова О. Є.¹, к.т.н., с.н.с. відділу тепломасообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>

Шейко Т. В.², к.т.н., старша дослідниця, пр.н.с. відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Резакова Т. А.¹, к.т.н., с.н.с., пр.н.с. відділу тепломасообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0009-0005-7478-3006>

Чернявський К. Є.¹, к.т.н., с.н.с. відділу тепломасообміну в дисперсних системах
<https://orcid.org/0009-0006-0703-6913>

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

²Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-25-16>

Предмет. Тепломасообмінні процеси та фізико-механічні методи обробки рослинної сировини для отримання пектиновмісних продуктів. **Мета.** Дослідити ефективність вилучення пектинових речовин із рослинної сировини шляхом застосування гідродинамічного оброблення з використанням роторно-пульсаційних апаратів та методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), а також оцінити вплив режимів обробки на якість і функціональні властивості кінцевого продукту. **Методи.** Рослинну сировину (яблучні вичавки, буряковий жом, морква) піддавали попередній підготовці, після чого обробляли у замкненій циркуляційній системі з роторно-пульсаційним апаратом, що забезпечував реалізацію методу ДІВЕ. Оброблення здійснювалося в умовах змінного гідродинамічного навантаження, що створювало локальні імпульсні зони високого тиску. Параметри процесу (тривалість, інтенсивність, кратність рециркуляції) варіювалися для досягнення оптимальної глибини гідролізу протопектину та екстрагування водорозчинного пектину. **Результати.** Встановлено, що застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії та роторно-пульсаційного апарата дозволяє інтенсифікувати процеси масообміну, зменшити тривалість гідролізу на 30–40%, знизити температуру обробки до 45–50°C та забезпечити високий вихід пектину без втрати його функціональних властивостей. Доведено, що імпульсна дія сприяє руйнуванню клітинних оболонок сировини, збереженню нативної структури целюлозного каркасу та покращенню органолептичних показників кінцевого продукту. **Сфера застосування результатів.** Результати дослідження можуть бути використані для розробки промислових технологій виробництва пектинових концентратів і функціональних харчових продуктів з радіопротекторними властивостями, а також для модернізації обладнання харчової та фармацевтичної промисловості.

Ключові слова: пектин, метод дискретно-імпульсного введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, кавітація, рослинна сировина, гідроліз, екстрагування, радіопротекторні властивості

PHYSICAL AND MECHANICAL METHODS IN THE PRODUCTION
OF PECTIN-CONTAINING PRODUCTS FROM PLANT RAW MATERIALS

*Oleksandr Obodovych¹, Dr. of Sc., Engineering, Professor,
Head of Department of Heat and Mass Transfer in Disperse Systems*
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

*Nataliia Husiatynska², Dr. of Sc., Engineering,
Professor Department of Sugar Technology and Water Preparation*
<https://orcid.org/0000-0001-9999-6650>

*Olesya Stepanova¹, PhD, Engineering,
Senior Researcher of Department of Heat and Mass Transfer in Disperse Systems*
<https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>

Tamila Sheiko³, PhD, Engineering, Senior Researcher,
Leading Researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Tetyana Rezakova¹, PhD, Engineering, Senior Researcher,
Leading Researcher of Department of Heat and Mass Transfer in Disperse Systems
<https://orcid.org/0009-0005-7478-3006>

Kostyantun Chernyavsky¹, PhD, Engineering, Senior Researcher
of Department of Heat and Mass Transfer in Disperse Systems
<https://orcid.org/0009-0006-0703-6913>

¹Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

³Institute of Food Resources of NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Subject. Heat and mass transfer processes and physico-mechanical methods for processing plant raw materials to obtain pectin-containing products. **Purpose.** To investigate the efficiency of pectin extraction from plant raw materials using hydrodynamic treatment with rotor-pulsation apparatuses and the discrete-pulse energy input (DPEI) method, as well as to assess the impact of processing parameters on the quality and functional properties of the final product. **Methods.** Plant raw materials (apple pomace, sugar beet pulp, and carrots) were pretreated and then processed in a closed-loop circulation system equipped with a rotor-pulsation apparatus implementing the discrete-pulse energy input method. The treatment was carried out under variable hydrodynamic loading conditions, generating localized high-pressure impulse zones. Process parameters (duration, intensity, and recirculation rate) were varied to achieve optimal hydrolysis depth of protopectin and extraction of water-soluble pectin. **Results.** It was established that the application of the discrete-pulse energy input method and rotor-pulsation apparatus intensifies mass transfer processes, reduces hydrolysis duration by 30–40%, lowers processing temperature to 45–50°C, and ensures a high pectin yield without loss of its functional properties. It was demonstrated that impulse action promotes the destruction of plant cell walls, preserves the native structure of the cellulose matrix, and improves the organoleptic characteristics of the final product. **Scope of the results.** The research findings can be used to develop industrial technologies for producing pectin concentrates and functional food products with radioprotective properties, as well as for upgrading equipment in the food and pharmaceutical industries.

Key words: pectin, discrete-impulse energy input method, rotor-pulsation apparatus, cavitation, plant raw materials, hydrolysis, extraction, radioprotective properties

Вступ. Актуальність виведення з організму людей важких і радіоактивних металів актуальна в усьому світі не лише через зростання техногенних ризиків, пов'язаних із радіаційним забрудненням, але й через потребу у доступних і безпечних засобах захисту організму від іонізуючого випромінювання, яке широко розповсюджене в промисловості, медицині, науковій сфері. Для України це питання особливо важливе в контексті радіаційної безпеки внаслідок військової агресії, потенційні техногенні ризики та необхідність реабілітації через забрудненість радіонуклідами.

Постановка проблеми. За даними ряду досліджень [1–3] існує можливість ефективного зниження накопичення радіонуклідів, іонів важких металів та пестицидів в організмі людини за рахунок використання пектинів. Зокрема, відомо, що пектин може виконувати роль радіопротектора та дієвий у складі лікувально-профілактичних продуктів з метою дезінтоксикації. Такий ефект пояснюється здатністю до взаємодії молекул пектину з іонами важких і радіоактивних металів та можливістю в подальшому утворювати комплекси. Ланцюг взаємодії реалізується за рахунок присутності в молекулах великої кількості вільних карбоксильних груп, оскільки саме низькоетирифіковані пектини проявляють найбільшу ефективність. Наразі доведено [1–3] взаємодію з плутонієм, цирконієм, цезієм-137 і стронцієм-90. Така унікальна властивість пектину викликає зростаючий інтерес, спонукаючи до пошуку природної сировини, яка володіє радіопротекторними і детоксикаційними властивостями не створюючи негативний вплив на організм людини. На сьогоднішній день обсяги світового ринку виробництва пектинової продукції щорічно збільшуються і за прогнозами [4] протягом 2025–2033 років середньорічний темп зростання становитиме не

менше ніж 7,0%. При цьому, найбільшим споживачем є харчова промисловість, де пектин використовують для стабілізації та покращення текстури продуктів, зокрема, для згущення, гелеутворення тощо. Іншим напрямком використання є фармацевтична галузь, де пектинову сировину застосовують в якості стабілізуючого та зв'язуючого компонента при отриманні різноманітних препаратів. Усе це створює сприятливі умови для збільшення частки виробництва пектинових продуктів саме з радіопротекторними властивостями. Наразі в якості сировини найчастіше застосовують вичавки цитрусів та яблук і рідше переробці піддають вичавки гарбуза, кошики соняшнику, морквяний і буряковий жом [4, 5]. З переліченої сировини виробництво яблучного пектину найчастіше асоціюється [1, 3] з радіопротекторними властивостями завдяки його здатності до комплексоутворення. Менш відомим, однак, перспективним, на думку [6–8] є переробка бурякового жому.

Серед овочів найбільша кількість пектину (від 6,4 до 30% на суху масу) міститься в буряках, моркві, дещо менша (від 1,7 до 23,6%) в гарбузових, а також в сім'ячкових плодах, тропічних та субтропічних продуктах. Причому, пектин, отриманий з яблучних вичавок, складає до 30% світового об'єму вмісту пектиновмісних продуктів. Типовий спосіб виробництва пектиновмісних продуктів з рослинної сировини заснований на кислотнотермічному гідролізі сировини, який включає підготовку сировини, гідроліз при підвищеній температурі з додаванням мінеральної кислоти, або її суміші зі спиртами [9].

Актуальним питанням сьогодення є розробка і впровадження прогресивних технологій переробки та використання вторинних сировинних ресурсів за допомогою фізико-механічних способів обробки сировини [10].

Дослідження використання кавітаційних технологій для гідролізу-екстрагування пектинових речовин з рослинної сировини свідчать про доцільність їх використання, що забезпечує екологічну чистоту та безпечність процесу при збереженні високого виходу та якості цільового компоненту [11–13]. При цьому зміною параметрів обробки можливо впливати на якісні показники отриманого пектину.

Метою роботи є огляд існуючих та пропозиції щодо нових технологій та обладнання для інтенсифікації отримання пектиновмісних продуктів з рослинної сировини за рахунок застосування фізико-механічних методів.

Матеріали та методи. В ході планування та проведенні досліджень використовували ряд фізико-хімічних та фізичних методів для визначення вмісту пектинових речовин та їх складових частин, які описані долі по тексту. Вимірювання виконували згідно загальноприйнятих рекомендацій.

Результати та обговорення. Вилучення пектинових речовин з сировини складається з двох взаємопов'язаних стадій: гідролізу протопектину та екстрагування пектину в розчин. Даний процес є визначальним для фізико-хімічних показників готового продукту.

Основними особливостями отримання пектинових речовин є кавітаційна обробка рослинного матеріалу у водному розчині. За основу фізико-механічного способу отримання пектину використано ідею використання морфологічних особливостей рослинних стінок сировини.

Видалення пектину пропонується проводити за рахунок створення невідновного стану системи: продукт – зовнішнє середовище шляхом накладання ультразвукового поля. У результаті чого на матеріал ззовні чиниться фізико-механічна дія, яка більша межі міцності матриці (протопектину) та менше межі міцності армуючого каркаса (целюлозних волокон). Тобто відбувається механічне руйнування матриці, при цьому армуючий каркас залишається неушкодженим. Як наслідок, два компоненти легко розділяються у результаті порушення між ними хімічного зв'язку.

На думку деяких вчених найбільш перспективним в процесах гідроліз-екстракції пектину з рослинної сировини є гідродинамічна кавітаційна обробка [14].

Для підвищення технологічних можливостей за рахунок глибини екстрагування було запропоновано спосіб виробництва пектиновмісних продуктів з рослинної сировини [9], який реалізується наступним чином.

Рослинну сировину попередньо підготовлюють (миють, подрібнюють), змішують із водою, завантажують, в технологічну ємність і нагрівають. Після розм'якшення рослинної сировини оброблена суміш насосом подається для гідродинамічного кавітаційного оброблення з одночасною подачею в зону кавітаційного оброблення сирної сироватки, внаслідок якого суміш зазнає інтенсивного фізико-механічного впливу. Завдяки цьому сировина диспергується, руйнуються її клітинні оболонки, підвищується поверхня розподілу фаз, внаслідок чого суттєво прискорюються реакції масообміну і глибина екстрагування пектинових речовин значно збільшується. Так, відомо, що при колапсі кожної кавітаційної бульбашки створюються високі локальні тиски (до 1000 МПа), що обумовлює сприятливі умови інтенсифікації процесу екстрагування.

Сирна сироватка містить близько 2% молочної кислоти ті інші аналогічні сполуки, що забезпечує необхідний для гідролізу пектиновмісних сполук водневий показник рН до 3,5. Крім того вона не змінює нативних властивостей сировини, позитивно впливає на органолептичні показники кінцевого продукту, розширює технологічні можливості запропонованого способу. Цьому сприяє багаторазова (принаймні подвійна) кратність гідродинамічного кавітаційного оброблення і подача сироватки безпосередньо в зону кавітаційного оброблення, а також можливе оброблення сировини в режимі рециркуляції з кратністю не менше двох, коли масообмінні реакції відбуваються найбільш повно.

Аналіз отриманих результатів показує, що запропонований спосіб виробництва пектиновмісних продуктів відрізняється від відомих технічних рішень меншою тривалістю процесу гідролізу та зниженою температурою процесу, що дозволяє вберегти високі споживчі якості пектиновмісних продуктів. Крім того, молочна сироватка є недефіцитним і доступним продуктом, який можна використовувати для оброблення широкого спектра продуктів.

Недоліком цього способу є те, що не зазначені конкретні параметри та режими гідродинамічної кавітаційної обробки, що ускладнює проведення процесів гідролізу-екстракції пектину з рослинної сировини.

Вченими і спеціалістами Київського політехнічного інституту та Вінницького національного аграрного університету запропоновано виробництво пектинового концентрату з використанням ультразвукових кавітаційних технологій [15].

Технологічну схему виробництва пектинового концентрату на основі ультразвукових кавітаційних технологій наведено на рис. 1.



Рис. 1. Технологічна схема виробництва пектинового концентрату

співвідношенні вичавок та води 1:10, підігрівають до температури суміші 40–50°C та подають в ультразвуковий кавітаційний апарат на стадію безперервного вилучення пектину з неї.

Схему розроблено в результаті експериментальних досліджень та аналітичних розрахунків [11, 12]. Вилучення пектину з пектиновмісної сировини включає стадії подрібнення, промивання, набухання та пресування пектиновмісної сировини, диспергування-екстрагування, розділення твердої та рідкої фаз і концентрування.

Сухі яблучні вичавки розміром 1–2 мм, вологістю 8% промивають у воді при температурі 25–45°C та гідромодулі 1:15 протягом 30 хв, після чого відділяють воду від промитої сировини та пресують до вмісту сухих речовин 12–14%. Підготовлену сировину змішують з водою у

Диспергування протопектину та екстрагування водорозчинного пектину виконують в ультразвуковому полі при таких параметрах процесу: інтенсивність 5–10 Вт/см², тривалість 45–60 хв. Далі суміш надходить на розділення, тобто відділення екстракту від відпрацьованих вичавок. Відділений екстракт упарюють та фасують. Перевагами запропонованої технології є: удосконалення способу отримання пектину та спрощення процесу за рахунок використання ультразвукової кавітаційної обробки сировини, відмова від використання кислот чи основ на стадії вилучення ключового компонента із сировини, екологічна чистота та безпечність при збереженні високого виходу та якості цільового компонента, можливість подальшого використання відпрацьованих вичавок для виробництва продуктів з підвищеним вмістом харчових волокон.

Для реалізації технології отримання пектинового концентрату розроблено машинно-апаратну схему (рис. 2). При цьому лінія складається зі стандартизованого обладнання хімічної та харчової промисловості.

Яблучні вичавки після набухання подаються у ємність 1 з перемішуючим пристроєм для промивання водою. Далі сировину відділяють від води на розподільному ситі 2 та відтискають на шнековому пресі 3. Відпресовані вичавки подають у збірник 4, де відбувається змішування з підігрітим екстрагентом лінії пом'якшеної води 5. Суміш подають до ультразвукових кавітаційних апаратів 6, у яких безперервно здійснюється диспергування-екстрагування протопектину у водному середовищі. Доцільно використовувати декілька одночасно працюючих апаратів, що дозволяє отримати необхідну тривалість обробки, при циркуляції технологічного середовища, та забезпечити визначену продуктивність лінії. При варіюванні технологічних параметрів обробки, зокрема гідромодуля, можливо змінювати час за рахунок зміни кількості циклів обробки або швидкості руху в апараті.

Ультразвукові кавітаційні апарати при зміні параметрів кавітації можливо універсально використовувати для різної пектиновмісної рослинної сировини.

Розділення обробленої маси відбувається у шнековому стікачі 8 на тверду та рідку (пектиновий екстракт) фази. Відпрацьовані яблучні вичавки (тверда фаза) можливо використовувати для виробництва пектиновмісних продуктів та харчових волокон.

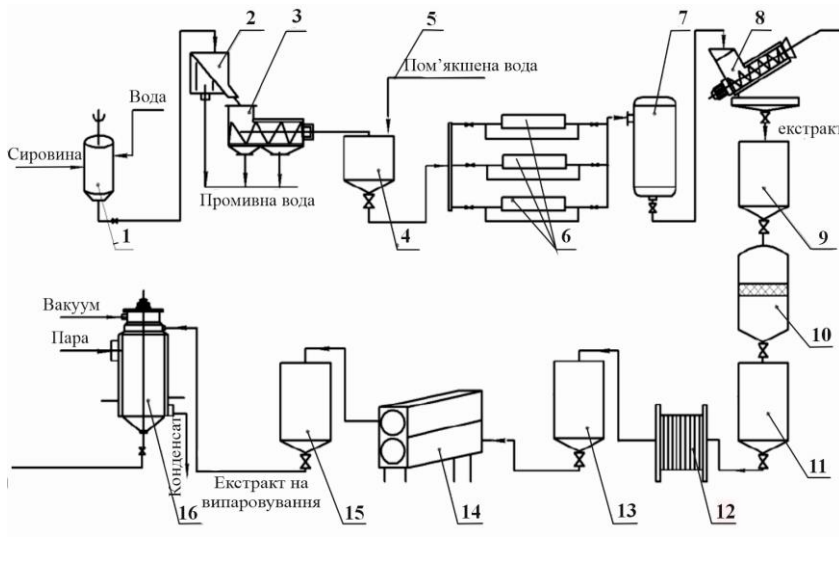


Рис. 2. Апаратно-технологічна схема виробництва пектинового концентрату з рослинної сировини із застосуванням ультразвукової технології:

- 1 – ємність промивання сировини; 2 – розподільне сито;
- 3 – шнековий прес;
- 4, 7, 9, 11, 13, 15 – збірники;
- 5 – лінія пом'якшеної води;
- 6 – ультразвукові кавітаційні апарати; 8 – стікач;
- 10 – кізьгуровий фільтр;
- 12 – ультрафільтраційна установка; 14 – підігрівач-пастеризатор; 16 – вакуум-випарний апарат

Пектиновий екстракт збирають у ємність 9. Далі екстракт пектиновий рідкий очищують на кізьгуровому фільтрі 10 та ультрафільтраційній установці 12. Очищений пектиновий екстракт підігрівають у підігрівачі-пастеризаторі 14 та концентрують у вакуум-випарному апараті 16. Після чого можливо його фасування і зберігання або подальша переробка з метою виробництва сухого пектиновмісного продукту.

Результати порівняльних експериментальних досліджень вилучення пектину з яблучних вичавок в ультразвуковому кавітаційному полі в екстракторі, до складу якого входить пристрій для ультразвукової кавітаційної обробки рідинних середовищ у закритому потоці, та з використанням класичної кислотної технології свідчать про те, що значення показника ступеню вилучення цільового компонента майже однакові (табл. 1).

Таблиця 1

Результати порівняльних досліджень

Показники	Традиційна технологія	Ультразвукова кавітаційна обробка, інтенсивністю, Вт/см ²		
		5	7	10
Екстрагент	фосфорна кислота	пом'якшена вода	пом'якшена вода	пом'якшена вода
Температура, °C	80	50	50	50
pH	1,8	5,8	5,8	5,8
Тривалість, хв	120	60	45	45
Ступінь вилучення пектину, %	85	78	83	85
Ступінь етерифікації, %	65	72	68	65

При цьому тривалість процесу вилучення пектину в 2–2,6 рази менша та відбувається при «м'якому» режимі обробки, з використанням у якості екстрагенту пом'якшеної води.

Недоліком цієї технології є її складність, зумовлена необхідністю підготовки пом'якшеної води і підігріву суміші вичавки та води до температури 50°C.

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено новий підхід до інтенсифікації тепломасообмінних процесів у гетерогенних системах, в основі якого лежить принципово новий метод дискретно-імпульсного вводу енергії (ДІВЕ), реалізація якого оптимально вирішує питання в багатьох технологічних процесах таких як: диспергування, нагрівання, гідроліз та екстракція.

Суть методу ДІВЕ полягає в тому, що енергія яка вводиться в апарат, розподілена дискретно в просторі (по всьому робочому об'єму системи), і в кожному елементі об'єму виділяється ефективна питома потужність у вигляді коротких імпульсів, тобто дискретно в часі. Цей принцип можна реалізувати практично, коли в рідкому середовищі рівномірно розподілити досить велику кількість газових бульбашок, які швидко розширюються і стискаються при періодичних і різких скидах тиску в системі. Система розподілених в рідині пульсуючих бульбашок є трансформатором енергії від зовнішнього джерела (наприклад, компресора), що працює в стаціонарному режимі, в енергію, дискретну за часом і простором. Це забезпечує в будь якій точці робочого об'єму високу питому потужність, виділену в імпульсі. Аномально високе значення швидкостей, прискорень і локальних тисків поблизу міжфазної границі бульбашок зумовлюють появу потужних гідродинамічних факторів: ударних хвиль, розвинутої турбулентності і т. п., а це, в свою чергу, дає змогу досягти граничних значень інтенсивності подрібнення при менших витратах енергії [16].

Мета ДІВЕ полягає в інтенсифікації тепломасообмінних та гідродинамічних процесів в технологічних середовищах, а також створенні методики їх оптимізації та способів управління.

Ідея ДІВЕ полягає в тому, щоб попередньо стаціонарно і довільним чином розподілену в робочому об'ємі енергію акумулювати в локальних дискретних точках системи і в подальшому імпульсно реалізувати для досягнення необхідних теплофізичних ефектів. Нетрадиційні методи інтенсифікації тепломасообмінних процесів шляхом дискретно-імпульсного введення енергії в дискретні середовища були покладені в основу розробки нових технологій гідролізу та екстракції рослинної сировини.

Найбільш ефективно метод ДІВЕ реалізується в роторно-пульсаційних апаратах. Особливо перспективним є використання цих пристроїв з метою обробки продуктів рослинного походження та складних біологічних систем для потреб харчової, консервної та

фармацевтичної індустрії. Накопичений в Інституті технічної теплофізики НАН України багаторічний досвід створення, вдосконалення та промислової експлуатації роторно-пульсаційних апаратів (РПА) різних модифікацій довів багатовекторність їх практичного застосування та принципову можливість раціонального та надійного використання для вирішення різних технологічних завдань [17].

Співробітниками Інституту технічної теплофізики НАН України були проведені дослідження щодо використання методу ДІВЕ та РПА для гідролізу сахарози та отримання глюкозо-фруктозних сиропів. Встановлено, що пропонується технологія та обладнання порівняно з існуючою дозволяє скоротити тривалість процесу більш ніж у 10 разів, проводити інверсію сахарози на 100%, при цьому одержувати готові сиропи, вміст оксиметилфурфуролу (ОМФ) у яких не перевищує встановлені норми, економити 5,26% цукру [18].

Застосування вищевказаного методу та обладнання дозволяє інтенсифікувати процес гідролізу високомолекулярних рослинних полісахаридів, таких як крохмаль та целюлоза у технологіях отримання харчового та паливного біоетанолу [19].

Підвищення ефективності процесу гідролізу із застосуванням методу ДІВЕ пов'язане з тим, що при обробці гідролізованої рослинної сировини в РПА виділяється енергія, яка носить характер спрямованої локальної, інтенсивної та концентрованої дії. Якщо енергія, що виділяється, перевищує енергію зв'язків між будь-якими атомами в молекулі, то відбувається їх розрив і за місцем розриву приєднується молекула води з утворенням нової речовини. У випадку гідролізу крохмалю та целюлози – це моносахариди у вигляді глюкози. Таким чином встановлено, що гідролізувати полісахариди можна шляхом застосування каталізаторів за рахунок введеної енергії, якщо остання буде перевищувати енергію зв'язку між атомами в цій молекулі. При недостатній кількості енергії, що вводиться, коли зв'язок розтягнутий, але ще не розірваний, слід вводити каталізатор, але в значно меншій пропорції.

Сучасні способи інтенсифікації масообмінних та гідродинамічних процесів в гетерогенних середовищах базуються на засадах ідеології екстракції за рахунок дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), в основу якої закладено принцип, що найбільш ефективне і економне використання енергії, яка витрачається на інтенсифікацію, передбачає рівномірний дискретний розподіл введеної енергії в кожній локальній точці робочого об'єму системи у формі короткочасних потужних імпульсів [20]. Цей принцип в тій чи іншій мірі реалізується при розробці інноваційних методів інтенсифікації екстракційних процесів – насамперед, в ультразвуковій, мікрохвильовій, пульсаційній, електророзрядній екстракції, а також при застосуванні роторно-пульсаційних та вібраційних апаратів. В усіх цих методах використовуються ефекти кавітації, яка вважається одним з потужних механізмів принципу ДІВЕ.

Застосування кавітаційних механізмів. Для ініціювання кавітаційних ефектів необхідно різко скинути тиск в рідині нижче тиску насиченої пари при даній температурі ($p_l < p_{sat}(T_l)$), що веде до формування і інтенсивного зростання парогазових бульбашок. Після наступного підвищення тиску в рідині до значень $p_l > p_{sat}(T_l)$ бульбашки швидко стискаються і миттєво захоплюються, випромінюючи при цьому локальні високо-амплітудні імпульси тиску, одночасно у всьому робочому об'ємі, що супроводжуються потужною динамічною дією на оточуюче середовище.

При ініціюванні кавітаційних процесів в об'ємі екстрагента з частинками сировини періодичне формування та колапс бульбашок відбувається як в об'ємі екстрагента поза частинками, так і в сировинному екстрагенті, який знаходиться в порах і клітинах всередині частинок. Внаслідок цього молекулярна дифузія в капілярах замінюється конвективною, що прискорює проникнення розчинника до клітинних структур сировини і переміщення цільових речовин в екстрагент, що в кінцевому підсумку, сприяє інтенсифікації масообміну. Завдяки дії ударних імпульсів на стадії колапсу бульбашок, може відбуватись руйнування клітинних структур і перенесення корисних речовин в екстрагент за рахунок їх вимивання.

Слід зазначити, що для прискорення внутрішнього переносу не обов'язково виконувати умову $p_1 < p_{\text{sat}}(T_1)$ для кавітаційного скипання рідини. Почергове стиснення та розрідження рідини всередині частинок при періодичній зміні тиску створює ефект «губки». Такий спосіб прискорення конвективного масопереносу, який запобігає руйнуванню клітин, також відносять до кавітаційних ефектів [20].

Стосовно інтенсифікації процесів екстракції кавітаційні механізми ініціюють шляхом акустичної дії із застосуванням різних ультразвукових пристроїв [21–23], при пробію рідини електричними розрядами [22, 24], при реалізації магнітоімпульсних ефектів, вакуум-пульсаційного методу [25], а також за рахунок створення оптимальних гідродинамічних умов в потоці екстрагованої суміші [20, 26].

При періодичному пробію рідини електророзрядами кавітаційні процеси реалізуються внаслідок утворення плазмових каверн, які швидко захоплюються з випромінюванням ударних імпульсів тиску, що дозволяє скоротити тривалість процесу, збільшити вихід цільових речовин і знизити енерговитрати [24].

В останні роки набуває популярності ефективна, екологічно чиста, малозатратна технологія, відома під назвою «кавітаційна екстракція під негативним тиском» (NPCE) [25], яка є проста в експлуатації і забезпечує більш високий вихід цільових речовин у порівнянні з традиційними методами. Екстрагент з дисперговою сировиною при кімнатній температурі знаходиться в резервуарі, в якому за допомогою вакуум-насоса підтримується низький тиск ($\sim 0,2$ атм) і в який безперервно барботується повітря. Вибухове зростання газових бульбашок перемішує і турбулізує суміш, що прискорює міжфазний масообмін. Цей метод, ефективний при обробці термолабільної сировини, лише умовно можна звати «газовою кавітацією».

Ще одним перспективним методом інтенсифікації процесів екстракції, де екстрагентом є вода, слід вважати попередню обробку екстрагента (води) у гідродинамічному кавітаційному пристрої. При цьому відбувається руйнування водневих зв'язків в молекулах води, що приводить до зміни фізико-хімічних властивостей екстрагента (його активації). Активований таким чином екстрагент успішно використовується в технологічних процесах екстракції з метою їх інтенсифікації.

Перевагою акустичних методів екстракції є високий ступінь вилучення цільових речовин, здатність руйнувати навіть дуже тверді структури, можливість змінювати частоту та інтенсивність ультразвукового поля. Інтенсивність ультразвукової дії та кавітаційні характеристики легко можуть бути адаптовані до конкретного процесу екстрагування. До числа основних недоліків слід віднести малі обсяги обробляемого середовища, надмірно високі енерговитрати, високу вартість обробки і апаратури, недовговічність акустичних випромінювачів через, що в сукупності обмежує можливість використання цих методів в промислових технологіях.

Альтернативою акустичній кавітації і серйозним конкурентом стосовно до інтенсифікації процесів екстрагування є гідродинамічна кавітація, яка здатна забезпечити всі умови ультразвукової кавітації, але в набагато більшому масштабі і з кращою енергетичною ефективністю [20, 26, 27].

Для реалізації процесів гідродинамічної кавітації застосовують різні типи РПА [20, 21, 23], сопла Вентурі [20], пульсаційні апарати, відцентрові насоси та інші типи кавітаційних реакторів проточного типу. Застосування в промисловості того чи іншого типу кавітаційного реактора залежить від поставленої технологічної задачі та від рівня питомих енерговитрат [20, 26].

Із наведеного огляду можна зробити висновки, що метод ДІВЕ та РПА, в яких він реалізується, досить широко використовується для проведення процесів гідролізу та екстракції в різних технологіях, але при приготуванні пектиновмісних продуктів практично не задіяний.

На думку авторів РПА можуть бути застосовані на стадії гідроліз-екстракції в технології приготування пектиновмісних продуктів. В Інституті технічної теплофізики НАН

Україні розроблена апаратурно-технологічна схема гідроліз-екстракції пектиновмісної сировини із застосуванням РПА.

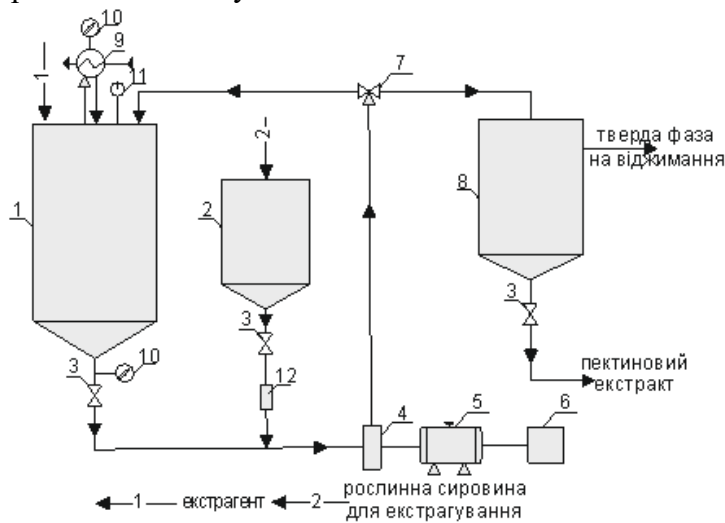


Рис. 3. Апаратурно-технологічна схема гідроліз-екстракції пектиновмісних продуктів з рослинної сировини:

- 1 – приймальний бункер;
- 2 – бункер для сировини, що підлягає екстрагуванню;
- 3 – двоходовий кран; 4 – роторно-пульсаційний апарат; 5 – електричний двигун;
- 6 – блок управління;
- 7 – триходовий кран; 8 – фільтр;
- 9 – дефлегматор; 10 – манометр;
- 11 – запобіжний клапан;
- 12 – вібродозатор

Процес гідроліз-екстракції здійснюється наступним чином. В приймальний бункер 1 подається екстрагент, а в приймальний бункер 3 – попередньо подрібнена до розмірів частинок не більше 500 мкм пектиновмісна рослинна сировина. Відкривають двоходовий кран 3 і вмикають РПА, який одночасно є відцентровим насосом. Трьохходовий кран 7 ставлять в положення, щоб екстрагент рухався по контуру приймальний бункер 1 – РПА 4 – приймальний бункер 1.



Рис. 4. Тепломасообмінна дослідно-промислова установка: 1 – приймальний бункер; 2 – ємність для сировини; 3 – вібродозатор; 4 – РПА; 5 – електродвигун

забруднених радіонуклідами.

Ключовим, енерго-, метало- та трудомістким етапом технології отримання пектину є процес гідроліз-екстракції, який потребує оптимізації з метою підвищення ефективності та зниження витрат.

Під час рециркуляції екстрагента вмикають дозатор 12 і в потік надходить рослинна сировина, що екстрагується. Таким чином по контуру вже циркулює суміш екстрагента і сировини, що підлягає екстрагуванню. Під час проходження через РПА суміш піддається різним впливам, описаним вище. Тривалість обробки встановлюється експериментально і залежить від екстрагента, сировини, температури та інших технологічних показників. Після закінчення обробки суміш подається на фільтр, де проходить відділення твердої фази від пектинового екстракту.

Фото дослідно-промислової тепломасообмінної установки для проведення гідроліз-екстракції пектинових речовин з рослинної сировини представлено на рис. 4.

Висновки. Виробництво пектину та пектиновмісних продуктів із відходів переробки рослинної сировини є актуальним напрямом світової харчової та біотехнологічної галузі. Для України ця проблема набуває особливої значущості в контексті забезпечення радіаційної безпеки, зумовленої військовими діями, потенційними техногенними ризиками та необхідністю реабілітації територій,

У межах вирішення зазначеної проблеми запропоновано нове тепломасообмінне обладнання, принцип роботи якого базується на методі дискретно-імпульсного введення енергії. Реалізація цього принципу здійснена в апараті роторно-пульсаційного типу.

Експериментально доведено, що завдяки інтенсифікації тепломасообмінних процесів у роторно-пульсаційному апараті можливо одночасно здійснювати диспергування, перемішування, нагрівання, розчинення, гідроліз та екстракцію, що значно спрощує технологічну схему та підвищує продуктивність.

Розроблено апаратно-технологічну схему процесу гідролізу-екстракції з використанням роторно-пульсаційного апарата, описано технологію отримання пектинового концентрату та представлено фото дослідно-промислової установки, що підтверджує практичну реалізованість запропонованого рішення.

Бібліографія

1. Evaluation of the use of pectin of children living in regions contaminated by caesium. Report. 2005. https://en.irsln.fr/sites/en/files/2023-10/IRSN_Report-DRPH-2005-008_Pectin.pdf (date of access: 15.10.2025).
2. Wang R., Liang R., Dai T., Chen J., Shuai X., Liu C. Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review. *Trends in food science & technology*. 2019. Vol. 91. P. 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.033>.
3. Nesterenko V., Nesterenko A., Babenko V., Yerkovich T., Babenko I. Reducing the ¹³⁷Cs-load in the organism of «Chernobyl» children with apple-pectin. *Swiss Med Weekly*. 2004. 10; 134(1-2):24-7. P. 24–28. <https://doi.org/10.4414/smw.2004.10223>.
4. Pectin market size, share, trends and forecast by raw material, end use, and region, 2025–2033. 2024. <https://www.imarcgroup.com/pectin-technical-material-market-report>.
5. Yapo B., Robert C., Etienne I., Wathélet B., Paquot M. Effect of extraction conditions on the yield, purity and surface properties of sugar beet pulp pectin extracts. *Food Chemistry*. 2007. Vol. 100 (4). P. 1356–1364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.012>.
6. Chen H., Fu X., Luo Z. Properties and extraction of pectin-enriched materials from sugar beet pulp by ultrasonic-assisted treatment combined with subcritical water. *Food Chemistry*. Vol. 168, 1. 2015. P. 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.078>.
7. Peighambardoust, S., Jafarzadeh-Moghaddam, M., Pateiro, M., Lorenzo, J., Domínguez, R. Physicochemical, thermal and rheological properties of pectin extracted from sugar beet pulp using subcritical water extraction process. *Molecules*. 2021. Vol. 26 (5). P. 1413. <https://doi.org/10.3390/molecules26051413>.
8. Мартинюк, А., Пастух, Г. Актуальні напрями утилізації відходів цукрового виробництва. *Екологічні науки*. 2019. 2(25). С. 187–190. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-31>.
9. Патент 65942 UA МПК C08B37/06 (2006.01), B01F5/00 Спосіб виробництва пектиновмісних продуктів з рослинної сировини / Литвиненко О.А., Некоз О.І., Горбач О.М.; Заявник Національний університет харчових технологій. № u201102617; Заявл. 09.03.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24, 2011 р.
10. Луговський О. Ф., Берник І. М. Використання фізичних полів для гідролізу-екстракції протопектину рослинної сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2008. № 3 (52). С. 92–100.
11. Берник І. М. Встановлення оптимальних параметрів технологічного процесу вилучення пектину з яблучних вичавок в ультразвуковому полі. *Вісник Національного технічного університету «Харківський полі-технічний інститут»*. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». 2009. № 45. С. 21–27.
12. Берник І. М., Луговський О. Ф., Крапивницька І. О. Особливості вилучення пектину в ультразвуковому кавітаційному полі та його. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2010. № 32. С. 59–63.
13. Луговський О. Ф., Берник І. М. Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з вторинної рослинної сировини. *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2010. № 1(5). С. 25–30.
14. Литвиненко О. А., Некоз О. І., Немирович П. М., Кондрат З. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості. К.: РВЦ УДУХТ, 1999. 87 с. ISBN 966-612-004-6

15. Луговський О. Ф., Берник І. М. Виробництво пектинового концентрату з використанням ультразвукових кавітаційних технологій. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. 2001. № 9. С. 159–163.
16. Долінський А. А. Принцип дискретно-імпульсного вводу енергії та його використання у технологічних процесах. Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей; Институт технической теплофизики НАН Украины. К: Академперіодика, 2015. 464 с.
17. Ободович О. М., Хоменко В. О., Сидоренко В. В., Степанова О. Є. Дискретно-імпульсний ввід енергії (ДІВЕ) та його реалізація шляхом застосування роторно-пульсаційних апаратів. Теплофізика та теплоенергетика. 2024. 46 (1). С. 29–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.4>.
18. Ободович А. Н., Хиби́на М. А., Боряк Л. А., Ободович А. А., Тесля А. И. Интенсификация производства глюкозо-фруктозных сиропов за счет механохимической деструкции. Промышленная теплотехника. 2006. 28(3). С. 44–49.
19. Ободович А. Н., Лымарь А. Ю. Дискретно импульсный ввод энергии (ДИВЭ) – интенсифицирующий метод гидролиза высокомолекулярных соединений. Промышленная теплотехника. 2013. 35(6) С. 23–30.
20. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в паро-жидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. К.: Наукова думка. 2008. 304 с. ISBN: 978-966-00-0702-3.
21. Chemat F., Khan M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. Ultrason. Sonochem, 18, 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.
22. Lijun Wang, Curtis L. Weller. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. Trends in Food Science & Technology. 17, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.12.004>.
23. Roctagno, M. and Prado, J. (Ed.). (2013). Natural product extraction: Principles and applications. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. 516 p. <https://doi.org/10.1039/9781849737579>.
24. Sensoy I., Sastry S. K. (2004). Extraction using moderate electric fields. Journal of Food Science, 69 (1), 7–13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17861.x>.
25. Roohinejad Sh., Koubaa M., Greiner R., Orlie V., Lebovka N. (2016). Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials. Trends in Food Science & Technology. 52, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.008>.
26. Parag R., Gogate P. R. (2011). Hydrodynamic cavitation for food and water processing. Food and Bioprocess Technology, 4(6), 996–1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>.
27. Shirsath S. R., Sonawane, S. H., Gogate, P. R. (2012). Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations: A review of current status. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 53, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.01.003>.

References

1. Evaluation of the use of pectin of children living in regions contaminated by caesium. Report. 2005. https://en.irsna.fr/sites/en/files/2023-10/IRSN_Report-DRPH-2005-008_Pectin.pdf (date of access: 15.10.2025).
2. Wang, R., Liang, R., Dai, T., Chen, J., Shuai, X., Liu, C. (2019). Pectin-based adsorbents for heavy metal ions: A review. Trends in food science & technology, 91, 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.033>.
3. Nesterenko, V., Nesterenko, A., Babenko, V., Yerkovich, T., Babenko, I. (2004). Reducing the ¹³⁷Cs-load in the organism of «Chernobyl» children with apple-pectin. Swiss Med Weekly, 10; 134(1–2):24–7, 24–28. <https://doi.org/10.4414/smw.2004.10223>.
4. Pectin market size, share, trends and forecast by raw material, end use, and region, 2025-2033. (2024). <https://www.imarcgroup.com/pectin-technical-material-market-report>.
5. Yapo, B., Robert, C., Etienne, I., Wathelet, B., Paquot, M. (2007). Effect of extraction conditions on the yield, purity and surface properties of sugar beet pulp pectin extracts. Food Chemistry, 100(4), 1356–1364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.12.012>.
6. Chen, H., Fu, X., Luo, Z. (2015). Properties and extraction of pectin-enriched materials from sugar beet pulp by ultrasonic-assisted treatment combined with subcritical water. Food Chemistry, 168 (1), 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.078>.

7. Peighambardoust, S., Jafarzadeh-Moghaddam, M., Pateiro, M., Lorenzo, J., Domínguez, R. (2021). Physicochemical, thermal and rheological properties of pectin extracted from sugar beet pulp using subcritical water extraction process. *Molecules*, 26 (5), 1413. <https://doi.org/10.3390/molecules26051413>.
8. Martyniuk, A., Pastukh, H. (2019). Current trends in sugar production waste disposal. *Environmental sciences*, 2 (25), 187–190. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-31>. [in Ukrainian].
9. Litvynenko, O. A., Nekoz, O. I., Horbach, O. M. (2011). Sposib vyrobnytstva pektinvmisnykh produktiv z roslynnoi syrovyny [Method for producing pectin-containing products from plant raw materials]: Ukrainian Patent № 65942. Natsionalnyi universytet kharchovykh tekhnolohii [National University of Food Technologies]. Filed March 9, 2011. Published December 26, 2011, Bulletin No. 24. [in Ukrainian].
10. Luhovskyi, O. F., Beryk, I. M. (2008). Vykorystannia fizychnykh poliv dlia hidrolizu-ekstraktsii protopektynu roslynnoi syrovyny [Use of physical fields for hydrolysis-extraction of protopectin from plant raw materials]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [Vibrations in engineering and technology], 3 (52), 92–100. [in Ukrainian].
11. Beryk, I. M. (2009). Vstanovlennia optymalnykh parametriv tekhnolohichnoho protsesu vyluchennia pektinu z yabluchnykh vychavok v ultrazvukovomu poli [Determination of optimal parameters of the technological process of pectin extraction from apple pomace in an ultrasonic field]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Tematychnyi vypusk «Khimia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia»* [Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Thematic issue «Chemistry, Chemical Technology and Ecology»], 45, 21–27. [in Ukrainian].
12. Beryk, I. M., Luhovskyi, O. F., Krapyvnytska, I. O. (2010). Osoblyvosti vyluchennia pektinu v ultrazvukovomu kavitatsiinomu poli ta yoho vlastyvoli [Features of pectin extraction in an ultrasonic cavitation field and its properties]. *Naukovi pratsi Natsional'noho universytetu kharchovykh tekhnolohii* [Scientific Works of the National University of Food Technologies], (32), 59–63. [in Ukrainian].
13. Luhovskyi, O. F., Beryk, I. M. (2010). Fizychna model' ultrazvukovoho kavitatsiinoho vyluchennia pektinu z vtorynnoi roslynnoi syrovyny [Physical model of ultrasonic cavitation extraction of pectin from secondary plant raw materials]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», seriia «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhezhennia»* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»], 1 (5), 25–30. [in Ukrainian].
14. Lytvynenko, O. A., Nekoz, O. I., Nemyrovych, P.M., Kondrat, Z. (1999). Kavitatsiini prystroi v kharchovii, pererobnii ta farmatsevtichnii promyslovosti [Cavitation devices in food, processing and pharmaceutical industries]. Kyiv: RVC UDUKht. 87 p. ISBN 966-612-004-6. [in Ukrainian].
15. Luhovskyi, O. F., Beryk, I. M. (2001). Vyrobnytstvo pektynovoho kontsentratu z vykorystanniam ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii [Production of pectin concentrate using ultrasonic cavitation technologies]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsional'noho aharnoho universytetu* [Collected Scientific Works of Vinnytsia National Agrarian University], 9, 159–163. [in Ukrainian].
16. Dolinskiy, A. A. (2015). Pryntsyp dyskretno-impul'snoho vvodu enerhiyi ta yoho vykorystannia u tekhnolohichnykh protsesakh [The principle of discrete-pulse energy input and its use in technological processes]. *Mikro- i nanourovnevyye protsessy v tekhnologiyakh DIVE: Tematicheskii sbornik statey; Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy*. [Micro- and nanoscale processes in DPEI technologies: Thematic collection of articles] – K. Akademperiodika. 464 p. [in Ukrainian].
17. Obodovych, O. M., Khomenko, V. O., Sydorenko, V. V., Stepanova, O. Ye. (2024). Dyskretno-impul'snyi vvod enerhii (DIVE) ta yoho realizatsiia shliakhom zastosuvannia rotorno-pulsatsiinykh aparativ [Discrete-pulse energy input (DPEI) and its implementation using rotor-pulsation devices]. *Teplofizyka ta teploenerhetyka* [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 46 (1), 29–38. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.4>.
18. Obodovych, A. N., Khibina, M. A., Boryak, L. A., Obodovych, A. A., Teslia, A. I. (2006). Intensifikatsiia proizvodstva hliukozo-fruktoznykh syropov za schet mekhanokhimicheskoi destruktzii [Intensification of glucose-fructose syrup production through mechanochemical destruction]. *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 28 (3), 44–49. [in russian].
19. Obodovych, A. N., Lyman, A. Yu. (2013). Diskretno-impul'snyi vvod enerhii (DIVE) – intensyfikuiushchyi metod hidroliza vysokomolekuliarnykh soedinenii [Discrete-pulse energy input (DPEI) – an intensifying method of hydrolysis of high-molecular compounds]. *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 35 (6), 23–30. [in russian].
20. Dolinskiy, A. A., Ivanitskiy, G. K. (2008). Teplomassoobmen i gidrodinamika v paro-zhidkostnykh dispersnykh sredakh. *Teplofizicheskie osnovy diskretno-impul'snogo vvoda energii* [Heat and

mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media. Thermophysical foundations of discrete-impulse energy input]. Kyiv: Naukova Dumka, 304 p. [in russian].

21. Chemat, F., Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.* 18, 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>.

22. Lijun Wang, Curtis L. Weller. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science & Technology.* 17, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.12.004>.

23. Roctagno, M. and Prado, J. (Ed.). (2013). Natural product extraction: Principles and applications. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK. 516 p. <https://doi.org/10.1039/9781849737579>.

24. Sensoy, I., Sastry, S. K. (2004). Extraction using moderate electric fields. *Journal of Food Science.* 69(1), 7–13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17861.x>.

25. Roohinejad, Sh., Koubaa, M., Greiner, R., Orlien, V., Lebovka, N. (2016). Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials. *Trends in Food Science & Technology.* 52, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.008>.

26. Parag, R., Gogate, P. R. (2011). Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food and Bioprocess Technology.* 4(6), 996–1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>.

27. Shirsath, S. R., Sonawane, S. H., Gogate, P. R. (2012). Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations: A review of current status. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.* 53, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.01.003>.