

СИСТЕМА ТЕХНОЛОГІЙ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ ЕНЕРГІЇ ДО ЕЛЕМЕНТІВ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Бурдо О.Г., д.т.н., проф., Терзієв С.Г. д.т.н., доц., Сиротюк І.В., PhD, доц.,
Молчанов М.Ю., аспірант, Бурдо А.К., доц.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Аналізуються глобальні прогностичні моделі розвитку людства: цикли Кондратьєва, індустріального революційного розвитку, концепція моделі «Римського клубу». Наведено шляхи виходу із сучасної кризи – конвергенція біо- нано та інформаційних технологій. Обґрунтовано пріоритетні напрямки розвитку: енергія, екологія, їжа. Обговорюються проблеми ключових процесів харчових технологій – екстрагування та дегідратації. Показано, що ефективним інструментом рішення основних проблем є електродинамічні технології. Формулюється гіпотеза можливості використання електромагнітних джерел енергії для адресної доставки енергії безпосередньо до елементів рослинної сировини для ініціювання гібридного процесу. Реалізація такого процесу може на порядки інтенсифікувати дифузійні процеси. В статті вирішується задача візуально підтвердити існування гібридного процесу, вивчити механізми його формування, отримати кількісні залежності впливу ключових факторів на енергетику та кінетику процесу. Наведено опис експериментального стенду та результати досліджень, які визначають наукову новизну роботи. Отримані дані були використані при організації процесу екстрагування в інноваційних мікрохвильових апаратах. Показано, що циркуляційні апарати мають вищу продуктивність по зрівнянню із традиційними. Цей факт є основним прикладним результатом роботи. Крім цього, наведена на принципова технологічна лінія, яка базується на системі інноваційних технологій, що розроблена на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту.

Ключові слова: енергія, харчові технології, моделювання, концентрування соків, екстракт, випарювання, підведення енергії.

Вступ. Процес індустріального розвитку людства постійно супроводжувався формуванням прогностичних моделей майбутнього. Серед таких моделей виділяються запропоновані 100 років тому цикли Кондратьєва. Створена на основі системного дослідження світової техніки модель Кондратьєва узагальнила періоди депресій, криз, спадів та бурхливих ростів у різні етапи розвитку людства.

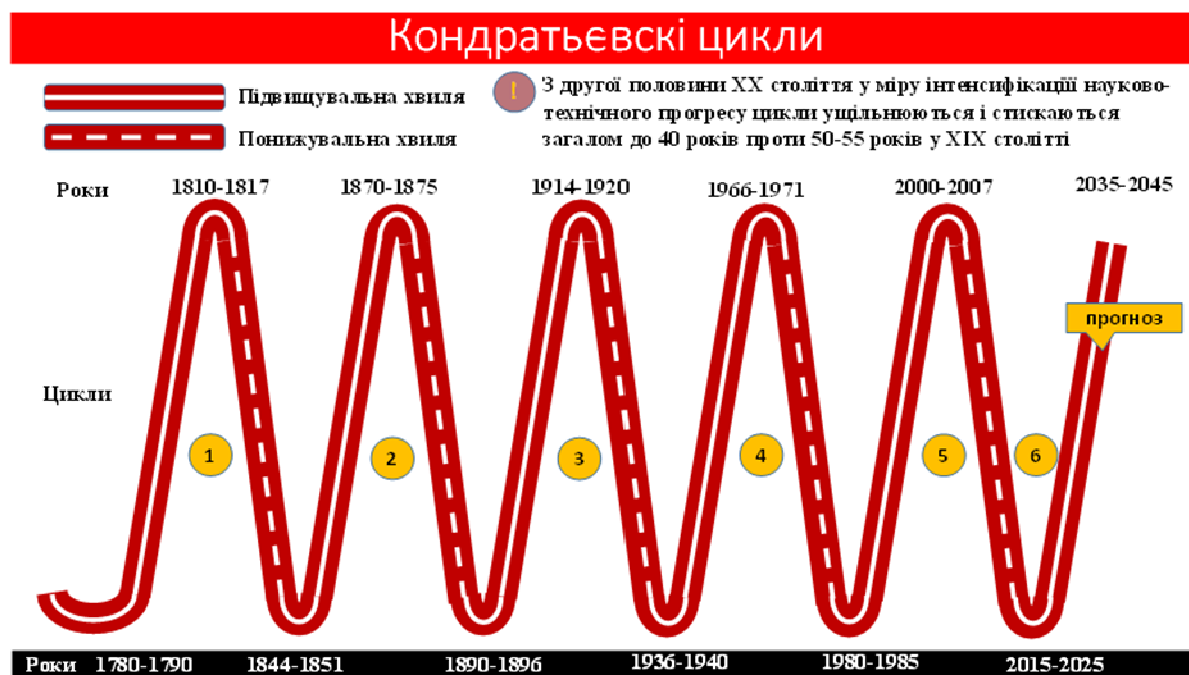


Рис. 1 – Цикли Кондратьєва

Усього розглянуто 6 циклів (укладів), що характеризувались загальними ознаками, загальним ключовим фактором (рис.2).

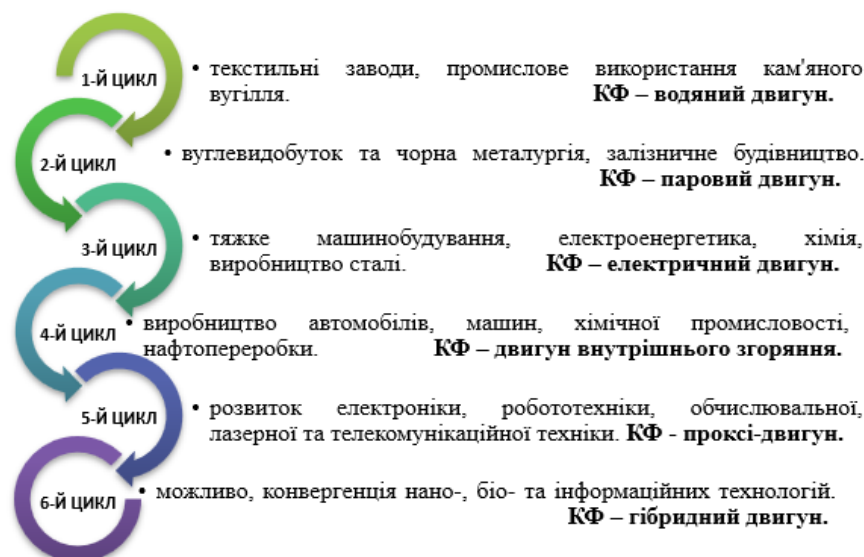


Рис. 2 – Характеристика та ключові фактори етапів циклів Кондратьєва

У першому циклі (1780 – 1850р.) флагманськими галузями були текстильні фабрики, промислове використання кам'яного вугілля, а ключовим фактором – водний двигун. У другому циклі (1850 – 1896р.) – металургія, залізничне будівництво, паровий двигун. У третьому циклі (1896 – 1940р.) – машинобудування, електроенергетика, неорганічна хімія, електричний двигун. У четвертому циклі (1940 – 1985р.) виробництво автомобілів переробка нафти, двигун внутрішнього згоряння. У п'ятому циклі (1985 – 2025р.) – розвиток електроніки, робототехніки, - проксі – двигун. Початок шостого циклу прогнозувався з 2014-2025р., а кінець у 2045році. Тут мають розвиватися конвергенція нано-, біо- та інформаційних технологій, а ключовим фактором ми вважаємо гібридний двигун. Кожен цикл відрізнявся флагманськими галузями, які диктували завдання іншим. Важливо, що сьогодняшня світова економічна криза прогнозувалася досить точно. Значно пізніше виникла схожа модель та індустріального розвитку людства, яка концептуально повторювала цикли Кондратьєва (рис.3).

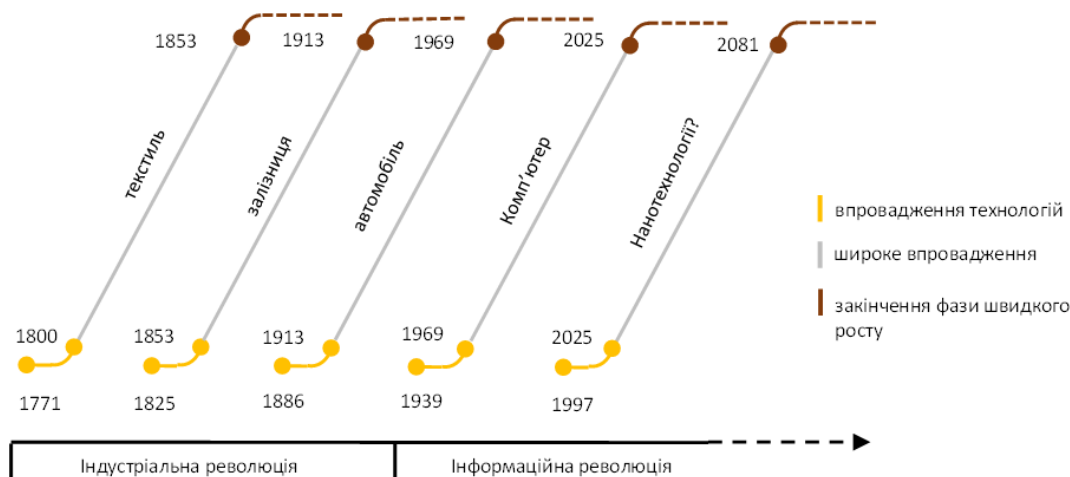


Рис. 3 – Модель індустріального розвитку людства

Модель визначає періоди індустріального розвитку та інформаційної революції.

Порівняємо цикли Кондратьєва з глобальною прогножною моделлю «Римського клубу», на яку визначимо концептуальні становища (табл.1).

Таблиця 1

Періоди формування глобальних криз моделі «Римського клубу»

Кризи	Періоди		
	Розвитки	Росту	Стабілізації
Енергії	1970 - 2000	2000 -2020	2020-2030
Екології	2010-2030	2030-2050	2050 -2070
Їжі	2040-2060	2060-2080	2080- 3000

Видно (табл.1), що ключовими проблемами людства цього століття будуть «енергія – екологія - їжа». Вирішення цих проблем – завдання агропромислової сфери. Інструменти їх вирішення визначимо із розглянутих вище моделей індустріального розвитку. Це – нано-біотехнології. Інноваційний шлях розвитку нанотехнологій харчових та фармацевтичних виробництв – це комбінована дія мікрохвильових, вакуумних та інших технологій для реалізації ефектів «механодифузії», організації гібридних процесів. Гібридний процес введений авторами в класичну класифікацію процесів, як інструмент організації механічних процесів у системі, як рушійна сила деякого «гібридного двигуна».

Нині людство перебуває у 6 циклі (рис.1). Вражає точність прогнозу сучасних проблем, воєн, світової пожежі, тероризму, протестів. А це підстава довіряти і певним шляхам виходу з кризи нашого етапу: конвергенція нано- та інформаційних технологій (рис.2). Схожі висновки випливають із відомої моделі індустріального розвитку людства (рис.3). Базові досягнення в науці та техніці відбуваються приблизно двічі у столітті. Важливо встановити й галузі економіки, які мають стати пріоритетними. Для цього звернемося до відомої глобальної прогнозної моделі Римського клубу [2]. Прогнозується, що у 2030 році людство очікує на гостру енергетичну кризу, до 2060 – екологічну, а до 2090 – кризу їжі. Всі ці проблеми найяскравіше виявляються в агропромисловому секторі [3]. Отже, економіка АПК буде пріоритетною у виході з цієї кризи, і пріоритетними будуть біо- нано технології. В [3] обґрунтовано і механізм взаємодії нанорозмірних елементів харчової сировини та електромагнітного поля (ЕМП). Виконаємо аналіз світового досвіду використання ЕМП у технологіях обробки харчової сировини.

Дослідження процесів обробки харчової сировини у електромагнітному полі.

Сучасний етап розвитку харчової та фармацевтичної індустрій характеризується стабільним зростанням інтересу до інноваційних продуктів, посиленням регламентацій з екологічної безпеки виробництва, підвищенням ефективності використання енергетичних та сировинних ресурсів [4 – 6].

У фармацевтичній індустрії, незважаючи на інтенсивний розвиток методів хімічного синтезу, динамічно зростає інтерес до виробництва біологічно активних препаратів із натуральної рослинної сировини. Фітопрепарати (ФП), що містять комплекс біологічно активних речовин (БАР), характеризуються широким спектром фармакологічної дії, ефективністю та малою токсичністю, що дозволяє використовувати їх тривалий час для профілактики та лікування багатьох захворювань без ризику виникнення побічних явищ. При переробці рослинної сировини ключовими процесами в харчових та фармацевтичних виробництвах є екстрагування, випарювання та сушіння. Традиційні апарати для цих процесів мають ряд загальних недоліків: досить тривалого часу обробки, недостатньої інтенсивності процесу, використання дорогих агентів, псування готового продукту, великих енергетичних витрат, великої трудомісткості процесу та в деяких випадках великих витрат самого продукту. Більше того, деякі традиційні апарати не дозволяють зберегти екологічну безпеку сировини. Використовуються брудні теплоносії, бензини інші не чисті екологічно розчинники як екстрагенти. Усе це визначає актуальність пошуку нових підходів до створення сучасного устаткування.

У світі зростає інтерес до методів, за яких інтенсифікація процесу досягається за рахунок використання електромагнітних технологій, що характеризуються високими питомими за потужністю впливами на біомасу, поміщену в камеру реактора. Так, потужність мікрохвиль вирішальним чином впливає швидкість сушіння, ефективну дифузію вологи і час сушіння. У міру збільшення потужності мікрохвиль швидкість сушіння та ефективна дифузійна здатність вологи збільшувалися, а час сушіння скорочується. Позитивні результати використання МВ отримані при сушінні насіння камелії олійної [7]; при сушінні кукурудзи та скибочок яблук [8]. Енерговитрати на мікрохвильову сушку в рази менше, ніж на електротермічну сушку при тій же завантаженні. Проблеми моделювання ліній сушіння при періодичному мікрохвильовому режимі, досліджені в [9], отримано хорошу відповідність до експерименту.

При сушінні насіння ківано (африканський огірок) вивчався вплив методів мікрохвильового сушіння та сублімаційного сушіння на хімічний склад, органолептичні, текстурні та антиоксидантні властивості насіння ківано, а також можливості мікрохвильового сушіння як альтернатива сублімаційному сушінню. Для цього насіння ківано було висушене за допомогою ліофілізатора та в мікрохвильовій сушарці. Мікрохвильова сушіння збільшила загальний вміст фенолів у насінні ківано, скоротила час процесу. В роботі показано, що мікрохвильова сушіння може стати перспективною інноваційною альтернативою для швидкого виробництва сублімованих фруктових матеріалів при збереженні якості продукту [10]. Проведено оптимізацію умов сушіння для виробництва якісних сушених ананасів з використанням попередньої обробки мікрохвилями перед звичайною сушкою гарячим повітрям. Показано, що мікрохвилі слід розглядати так само, як етап попередньої обробки промислового виробництва ананасу та інших продуктів, щоб скоротити час сушіння та отримати продукцію вищої якості [11].

Вперше кінетика сушіння та дегідратації нарізаної гіркої діни була досліджена з використанням мікрохвильового низькотемпературного сушіння. Щільність потужності мікрохвиль відіграла вирішальну роль у характеристиках дегідратації висушеної гіркої діни при сушінні за допомогою мікрохвиль [12]. При дослідженні мікрохвильового сушіння зеленої ріпи, регульована потужність мікрохвиль, що падає, краще для поліпшення якості продукту і зниження енергоспоживання. Шляхом порівняння безперервного та переривчастого мікрохвильового сушіння з поступовим зниженням мікрохвильової потужності була запропонована стратегія управління мікрохвильовою сушкою стрижневого кореня зеленої ріпи, заснована на експеримен-

тально визначених діелектричних властивостях та зміні напруженості електричного поля залежно від тимчасового вмісту вологи. Експерименти показали, що таке регулювання потужності призводить до більш високого коефіцієнта дегідратації сушеної зеленої ріпи та суттєвого зниження енерговитрат, ніж при безперервному та переривчастому мікрохвильовому сушінні. Крім того, така стратегія управління потужністю може підтримувати температуру матеріалу в межах заданих значень із малими коливаннями [13]. Досліджено вплив потужності мікрохвиль, ступеня вакууму та ваги завантаження на вміст вологи у білому винограді без кісточок під час вакуумного сушіння у мікрохвильовій камері. Встановлено, що під час мікрохвильового вакуумного сушіння ефективний коефіцієнт дифузії вологи білого винограду без кісточок коливається від $1,0232 \times 10^{-9}$ до $4,6354 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [14].

При дослідженні процесу випарювання вишневий нектар та яблучний сік концентрували з використанням традиційного термічного методу та переривчастого мікрохвильового концентрування в умовах вакууму (при 250 мбар). Загальний вміст фенолів у зразках яблучного соку та вишневого нектару коливався в межах 209,87-216,67 мг/л та 571-588,57 мг/л відповідно [15]. Сік барбарису концентрували двома різними способами (непряме нагрівання та випарювання в мікрохвильовій установці при тиску 100 і 30 кПа) до досягнення 60 градусів за шкалою Брікса. Результати показали, що швидкість мікрохвильового випарювання була на 49% вищою, ніж при непрямому нагріванні. Крім того, застосування цього методу може краще зберегти вміст антоціанів, антиоксидантну активність та загальний вміст фенолів у соку барбарису порівняно із звичайним методом [16]. При концентруванні апельсинового соку з використанням мікрохвильового вакуумного випарювання (MBV) та роторного випарювання (РВ) досліджувалась кінетика деградації вітаміну С, загальний вміст фенолів (ТРС), загальний вміст каротиноїдів (ТСС) та значення кольору. MBV значно підвищив швидкість випарювання. Результати показали, що константи швидкості деградації вітаміну С, ТРС та ТСС апельсинових соків, концентрованих з використанням РВ, були значно вищими, ніж MBV [17]. Досліджувалося використання мікрохвиль як альтернативи традиційним методам випарювання під час концентрування цукрових розчинів. Крім того, діелектрична спектроскопія може бути ефективним інструментом, що допомагає використовувати MBV для отримання високоякісних цукрів [18]. Встановлено, що мікрохвильове нагрівання можна використовувати для концентрування ананасового соку з мінімальним впливом на якісні характеристики [19]. Позитивні результати використання мікрохвиль при сушінні та екстрагуванні були досягнуті при переробці пажитника. Метод був оптимізований з урахуванням і сушіння та екстракції. Рекомендовані режими мінімального споживання енергії [20].

У результаті критичного аналізу науково-технічної літератури зроблено такі висновки.

1. Дослідженням процесів мікрохвильової обробки різнорічної сировини у світі широко займаються. Очевидна позитивна тенденція та різноманітність об'єктів досліджень.
2. Наголошується на доцільності застосування мікрохвильових технологій з метою інтенсифікації процесів перенесення, поліпшення якісних характеристик готового продукту.
3. Відсутні теоретичні основи процесів взаємодії електромагнітних полів із сировиною. Немає рекомендацій щодо керування параметрами електродинамічних систем. Відомі дослідження обмежуються лише лабораторними стендами.

Тому автори поставили завдання:

- Розвинути запропоновану в [3] модель гібридних процесів;
- сформулювати науково-технічну гіпотезу ініціювання гібридних процесів;
- Отримати візуальні картини їх формування, дослідити кінетику та енергетику гібридних процесів.

Результати візуальних, кінетичних та енергетичних досліджень гібридних процесів.

Формулюється наступна науково-технічна гіпотеза: «При взаємодії електродинамічних полів з капілярно-пористими матеріалами можливі умови виникнення гібридного процесу, який ініціює перебіг гідродинамічного перенесення цільових компонентів із глибини об'єму дисперсійну фазу». Розуміння таких умов дозволить параметрами електромагнітного поля керувати локацією, кінетикою та енергетикою гібридних процесів. В результаті з'явиться інструмент управління електродинамічними апаратами, їх оптимізації за продуктивністю, енергетичними витратами, якісними характеристиками готового продукту.

Для вирішення поставлених завдань розроблено експериментальний стенд (рис. 4).

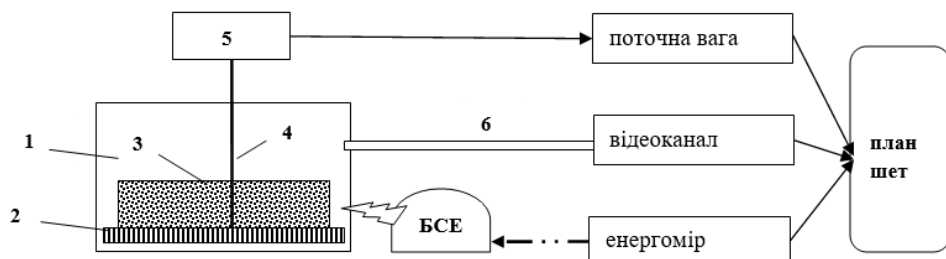


Рис. 4 – Схема експериментального стенду

У резонаторній камері 1 на полиці 2 розміщена робоча ділянка 3 - блок скляних трубок, заповнених підфарбованою водою. Полиця за допомогою ліски 4 підвішена до цифрових ваг 5, марки Radwag PS 750/C/1. Споживана блоком силової електроніки (БСЕ) потужність вимірюється енергоміром Feron TM55. Поточна вага робочої ділянки, споживана потужність та відеоролик викидів з блоку фіксуються планшетом Chuvі.

Методика підготовки робочої ділянки. Трубки ретельно калібрувалися, нумерувалися, зважувалися, заповнювалися підфарбованою водою, зважувалися та збиралися до блоку (рис. 5)

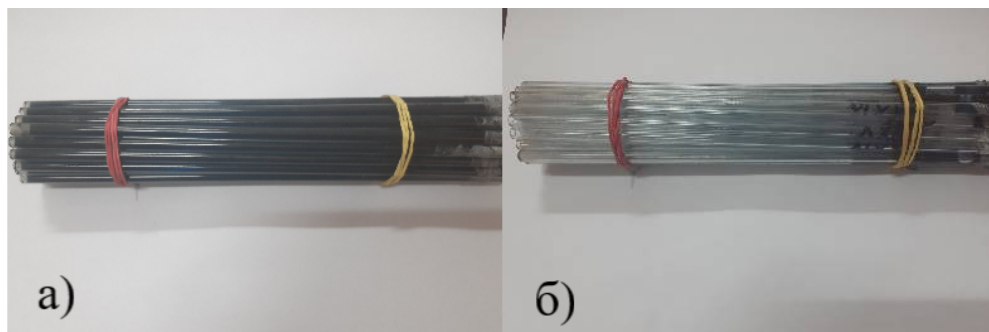


Рис. 5 – Фотографії робочої ділянки: а – перед обробкою; б) – після обробки

Результати досліджень наведено на рис. 6 – 9.

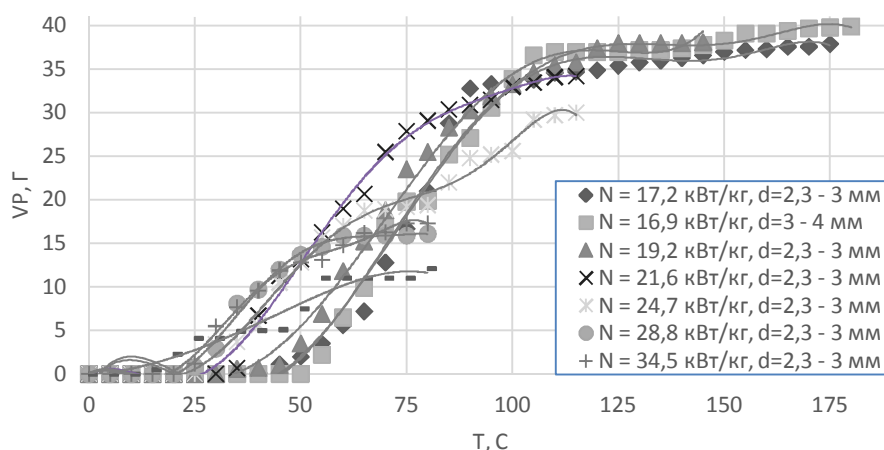


Рис. 6 – Сумарний вихід води у гібридних процесах

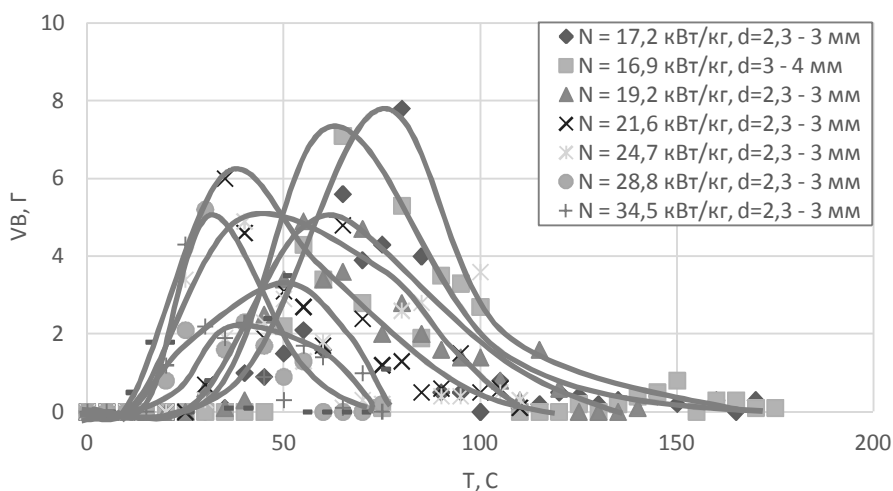


Рис. 7 – Точковий вихід води

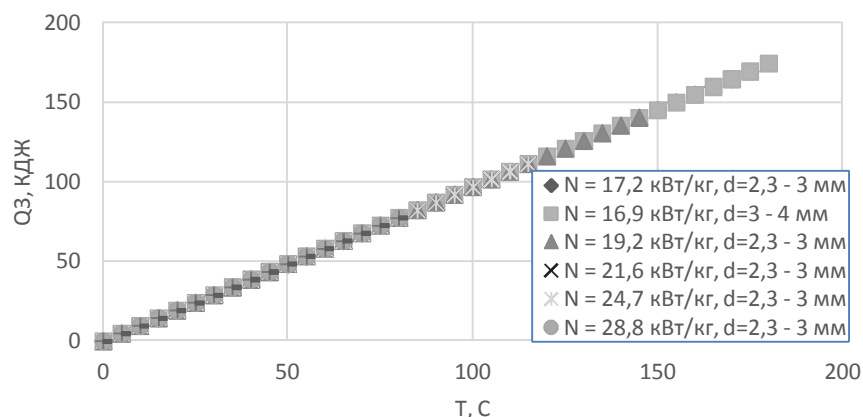


Рис. 8 – Витрата енергії

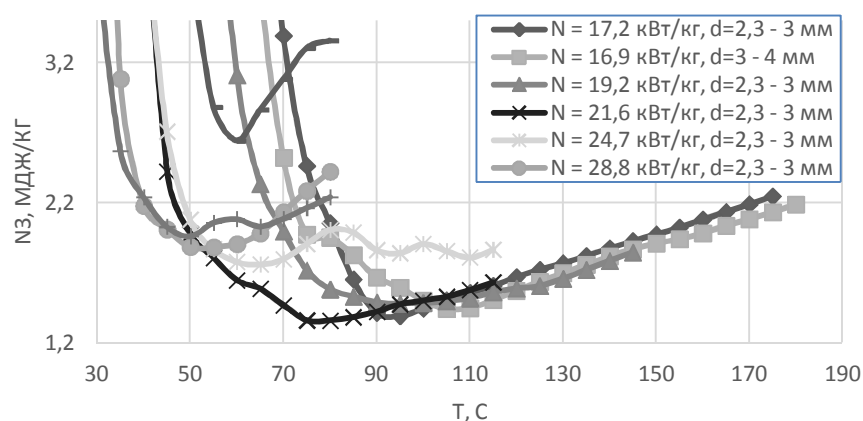


Рис. 9 – Питомі витрати

Умови проведення експериментів з іншими пучками труб, кінетичні та енергетичні характеристики наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати експериментального моделювання

Параметри пучка	Наведена потужність, кВт/кг	Час запуску ефекту, с	Час піку ефекту, с	Час згасання ефекту, с	Питома енерговитрата на піку, МДж/кг	Обсяг викидів на піку, г
$d = 3-4$ мм	42,4	20	55	80	2,1	3,2
$d = 3-4$ мм	33,9	25	50	75	1,7	3,3
$d = 3-4$ мм	28,3	30	75	135	2,2	1,2
$d = 3-4$ мм	24,2	25	50	145	1,7	2,6
$d = 3-4$ мм	21,2	35	85	180	1,5	5,6
$d = 3-4$ мм	20,8	35	90	120	1,35	3,7
$d = 3-4$ мм	18,8	35	115	180	1,5	2,2
$d = 3-4$ мм	16,9	50	105	180	1,4	2,7
$d = 3-4$ мм	16,8	55	110	180	1,4	2,7
$d = 3-4$ мм	12,7	30	150	220	1,5	2,5
$d = 3-4$ мм	10	55	185	300	1,6	1,5
$d = 3-4$ мм	5,6	165	340	380	1,3	1,7

Аналіз результатів дослідів показує, що гібридний процес складається з кількох етапів: запуску, зростання інтенсивності та досягнення піку та згасання. При цьому:

- час запуску корелюється з питомою потужністю, а мінімуми питомих витрат енергії відповідають меншим потужностям;
- на піках викидів питомі витрати енергії мінімальні та становлять 1,3 – 1,4 МДж/кг;
- максимальні за обсягом викиди та їх частота спостерігаються на піку ефекту;

- у капілярах більшого діаметра (навіть за однакового обсягу рідини) процес формування гідродинамічного потоку збільшувався на 5...15с;
- при початковій температурі 15°C інтенсивність гібридного процесу була нижчою в 2 рази, ніж за температури 40°C, енергетичні витрати на процеси при початкових температурах 15 і 40°C, за час експерименту в 50 с. склали 2,36 та 1,7 МДж/кг відповідно.

На основі принципів нанотехнологій, при організації гібридних процесів, пропонується технологічна лінія переробки рослинної сировини, яка включає інноваційні апарати, розроблені на кафедрі ПОЕМ (рис.10).

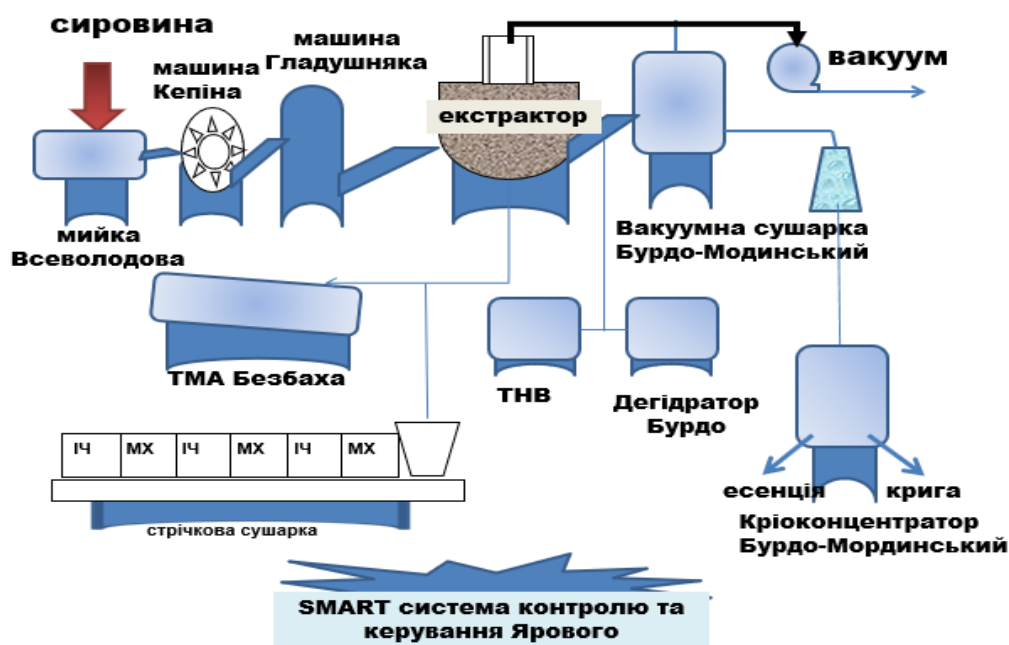


Рис. 10 – Система технологій ОНТУ

Опис обладнання (рис. 10) представлено на сайті [21].

Висновки. Історія свідчить, що вихід із економічних криз завжди базується на інноваційних підходах. Прогнозується, що наразі інструментом таких інновацій має стати поєднання біо- нано – та інформаційних технологій. В роботі представлено дослідження процесів адресної доставки енергії до рідкої фази капілярно-пористої харчової сировини. Експериментально, візуально доказано, що за умов узгодження структури сировини та параметрів мікрохвильового поля має місце специфічний потік паро рідинної суміші із об'єму твердої фази. Потік має гідродинамічне походження, його потужність на порядки перевищує дифузійні потоки. Результати роботи можна використати для розробки основ теорії гібридних процесів масоперенесення, та в практичних задачах організації ефективних режимів екстрагування.

References

1. Tsikli Kondrat'yeva (2023). Retrieved from https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva
2. Meadowsetal (1972). Thelimitstogrowth: a report to the club of Rome.
3. Kravchenko O. Yu., Molchanov M. Yu., Milinchuk K. S., Terziyev S. H., Petrovs'kiy V. V. (2022). Doslidzhennya protsesiv sushinnya reolohichnikh kharchovikh sistem v ich poli. *Scientific works*. 86(1), 91-99.
4. Trojahn S. (2018). Logistics strategies for resource supply chains. *Transport and telecommunication journal*. 19(3). Doi: 10.2478/ttj-2018-0021.
5. Landgrebe D., Kräusel V., Bergmann M., Werner, M., Rautenstrauch A. (2017). Conserving resources in production - breaking new ground. *Procedia manufacturing*, 8, Doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079.
6. Irmak S. (2017). Biomass as raw material for production of high- value products. *Biomass volume estimation and valorization for energy*, Doi:10.5772/65507.
7. Zhang, Dy; Huang, D; Zhang, Xy; Zhao, Hy; Gong, Gl; Tang, Xh; Li, Lj. (2023). Drying performance and energy consumption of camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying. *Food science and biotechnology*. Doi10.1007/s10068-022-01239-0.
8. Liu, Hl; Liu, Hy; Liu, Hy; Zhang, X; Hong, Qc; Chen, W; Zeng, X. (2021). Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in china. *Processes*. 9(9), doi10.3390/pr9091511.
9. Tepe, T.K.; Tepe, B.(2020). The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices. *Heat and mass transfer*.56(11).Doi10.1007/s00231-020-02907 9.

10. Bolek, S. (2021). Potential of energy saving by microwave drying for waste cucumis metuliferus seeds as alternative to freeze drying. *Environmental engineering and management journal* 20(9).
11. Abano, Ee. (2021). Microwave assisted convective air drying of sugarloaf pineapples (ananas comosus). *Applied engineering in agriculture*. 37(5). Doi10.13031/aea.14380.
12. Nguyen, Tvl; Nguyen, Pbd; Tran, Ttv; Tran, B.L.; Huynh, Tp. (2022). Low-temperature microwave-assisted drying of sliced bitter melon: drying kinetics and rehydration characteristics. *Journal of food process engineering*. 45(12). Doi10.1111/jfpe.14177.
13. Wang, Rf; Zhao, D.H; Gao, Yp; Xu, Q; Wu, L; Li, Zy. Power control in microwave drying of green turnip. *Drying technology*. 40(10). Doi10.1080/07373937.2021.1927073.
14. Lei, Yd; Chen, JI; Zhang, Zh; Deng, Xr. (2022). Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*. 42. Doi10.1590/fst.37020.
15. Dincer, C. (2021). Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 55(3). Doi10.1080/08327823.2021.1952837.
16. Nejad, S.L.; Shahedi, M; Fathi, M. (2021). Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of agricultural science and technology*. 23(2).
17. Bozkir, H; Tekgul, Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*. 46(6). Doi10.1111/jfpp.15902.
18. Tao, Y; Yan, Bw; Zhang, N.N; Wang, M.F; Zhao, Jx; Zhang, H; Chen, W; Fan, Dm. (2021). Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: a study based on dielectric spectroscopy. *Journal of food engineering*. 294. Doi10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.
19. Chua, Ls; Leong, C.Y. (2020). Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*. 44(10). Doi10.1111/jfpp.14786.
20. Khan, Mki; Ghauri, Ym; Alvi, T; Amin, U; Khan, M.I; Nazir, A; Saeed, F; Aadil, R.M; Nadeem, M.T; Babu, I. (2022). Microwave assisted drying and extraction technique; kinetic modeling, energy consumption and influence on antioxidant compounds of fenugreek leaves. *Food science and technology*. 42. Doi10.1590/fst.56020.
21. Nanofood (2023), Retrieved from <http://nanofood.com.ua>

THE SYSTEM OF TECHNOLOGIES OF ADDRESSED ENERGY DELIVERY TO FOOD ELEMENTS

Burdo O.G., d.t.s., professor, Terziev S.G., d.t.s., associate professor, Sirotiyuk I.V., PhD, associate professor, Molchanov M.Yu., assistant, Burdo A.C., c.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Global predictive models of human development are analyzed: Kondratiev cycles, industrial revolutionary development, the concept of the "Club of Rome" model. The convergence of bio-nano and information technologies are presented as ways out of the modern crisis. The priority areas of development such as energy, ecology, food, are substantiated. The problems of the key processes of food technology - extraction and dehydration - are discussed. It is shown that electrodynamic technologies are an effective tool for solving the main problems. A hypothesis about the possibility of using electromagnetic energy sources for the targeted delivery of energy directly to the elements of plant raw materials to initiate the hybrid process is formulated. Implementation of such a process can intensify diffusion processes by orders of magnitude. The article solves the task of visual confirming the existence of a hybrid process, studying the mechanisms of its formation, obtaining quantitative dependences of the influence of key factors on the energy and kinetics of the process. A description of the experimental stand and research results that determine the scientific novelty of the work are given. The obtained data were used in the organization of the extraction process in innovative microwave devices. It is shown that circulation devices are more productive compared to traditional ones. This fact is the main applied result of the work. In addition, a basic technological line based on the system of innovative technologies developed at the Department of Processes, Equipment and Energy Management is presented.

Keywords: energy, food technologies, modeling, concentration of juices, extract, evaporation, electromagnetic energy supply.

Список використаної літератури

1. Цикли Кондратьєва: [Веб-сайт]. Одеса, 2023. URL: https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva/ (дата звернення: 12.11.2023).
2. Meadowsetal. Thelimitstogrowth: a report to the club of rome. – 1972.

3. Дослідження процесів сушіння реологічних харчових систем в іч полі. / Кравченко О. Ю. та ін. // Наукові праці. 2022., вип. 1 Т. 86. С. 91-99.
4. Trojahn S. Logistics strategies for resource supply chains // *Transport and telecommunication journal*. 2018., 19(3). Doi: 10.2478/ttj-2018-0021.
5. Conserving resources in production - breaking new ground. / Landgrebe D. et al. // *Procedia manufacturing*. 2017. № 8. Doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.079.
6. Irmak S. Biomass as raw material for production of high- value products // *Biomass volume estimation and valorization for energy*, 2017. Doi:10.5772/65507.
7. Drying performance and energy consumption of camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying. / Zhang D. et al. // *Food science and biotechnology* Doi10.1007/s10068-022-01239-0.
8. Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in china / Liu H. et al. // *Processes*. 2021., No. 9 Vol. 9. P. 12. doi10.3390/pr9091511.
9. Tepe, T.K., Tepe, B. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices // *Heat and mass transfer*. 2020. 56(11). Doi10.1007/s00231-020-02907-9.
10. Bolek, S. Potential of energy saving by microwave drying for waste cucumis metuliferus seeds as alternative to freeze drying // *Environmental engineering and management journal* 20(9). 2021.
11. Abano, Ee. Microwave assisted convective air drying of sugarloaf pineapples (ananas comosus). *Applied engineering in agriculture*. 2021. 37(5). Doi10.13031/aea.14380.
12. Low-temperature microwave-assisted drying of sliced bitter melon: drying kinetics and rehydration characteristics. / Nguyen T. et al. // *Journal of food process engineering*. 45(12). 2022., No. 12 Vol. 45. P. 100. Doi10.1111/jfpe.14177.
13. Power control in microwave drying of green turnip / Wang R. et al. // *Drying technolog.* null., No. 10 Vol. 40. P. 10-15. Doi10.1080/07373937.2021.1927073.
14. Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. / Lei Y. et al. // *Food science and technology*. 2022. № 42. P. 236. Doi10.1590/fst.37020.
15. Dincer, C. Effect of intermittent microwave vacuum concentration on quality parameters of apple juice and sour cherry nectar and mathematical modeling of concentration // *Journal of microwave power and electromagnetic energy*. 2021. 55(3). Doi10.1080/08327823.2021.1952837.
16. Nejad, S.L.; Shahedi, M; Fathi, M. Comparative study of microwave-assisted vacuum evaporation, microwave-assisted evaporation, and conventional evaporation methods on physicochemical properties of barberry juice. *Journal of agricultural science and technology*. 2021. 23(2).
17. Bozkir, H; Tekgul, Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. // *Journal of food processing and preservation*. 2022. 46(6). Doi10.1111/jfpp.15902.
18. Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: a study based on dielectric spectroscopy. / Tao Y. et al. // *Journal of food engineering*. 2021. № 294. Doi10.1016/j.jfoodeng.2020.110414.
19. Chua, Ls; Leong, C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. // *Journal of food processing and preservation*. 2020. 44(10). Doi10.1111/jfpp.14786.
20. Microwave assisted drying and extraction technique; kinetic modeling, energy consumption and influence on antioxidant compounds of fenugreek leaves. / Khan M. et al. // *Food science and technology*. 2022. № 42. Doi10.1590/fst.56020.
21. Nanofood: [Веб-сайт]. Одеса, 2023. URL: <http://nanofood.com.ua/> (дата звернення: 15.11.2023).

Отримано в редакцію 11.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 11.06.2023
Approved 26.09.2023