

ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

Бурдо О.Г., д.т.н., проф., Бурдо А.К., к.т.н., доц.
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Проведено аналіз прогнозних моделей розвитку людства: «Римського клубу» та «Хвилі Кондрат'єва». Обґрунтовано пріоритет агропромислового комплексу України у відновленні економіки країни у повоєнний час. Інструментом відновлення мають стати інноваційні енерготехнології. Формуються інноваційні гіпотези процесів енергоефективного зневоднення, екстрагування та інактивації мікроорганізмів. Для реалізації таких гіпотез залучаються принципи організації гібридних процесів. Метою роботи є розробка інноваційних технологій та обладнання електродинамічного типу для переробки рослинної сировини. Науковою новизною роботи є новітні технології, що замінюють застарілі та забезпечать випуск продукції вищої якості, при менших витратах енергії та екологічного навантаження на довкілля. Розглядаються експерименти, які підтверджують такі можливості при реалізації ефектів «механодифузії» та «пародинамічного». Показано, що організація гібридних процесів спроможна виконувати роботу по транспортуванню рідини в капілярах сировини, що може на порядки інтенсифікувати масоперенесення, перейти на безвідходні технології.

Ключові слова: прогнозні моделі, енергоефективність, технології харчування, зневоднення, екстрагування

Вступ. Згідно прогнозної моделі «Римського клубу» до кінця століття людство буде стурбовано проблемами енергії, екології та їжі [1]. А ці проблеми сконцентровані в АПК. У повоєнний час енергія стане не тільки важливим техніко – економічним фактором, але й інструментом управління виробництвом, засобом рішення енерготехнологічних парадоксів в АПК. При відновленні зруйнованої економіки ключовим питанням буде: інвестувати у застарілі технології, чи впроваджувати інноваційні. Віковий досвід індустріального розвитку людства свідчить, що саме після пандемій, революцій та воєн йде бурхливий розвиток інноваційних технологій. Циклічність розвитку відображає запропонована сто років тому модель «Хвилі Кондрат'єва» [2]. Вражає точність прогнозу сьогодення у циклах підвищувальних та понижувальних хвиль (рис. 1).

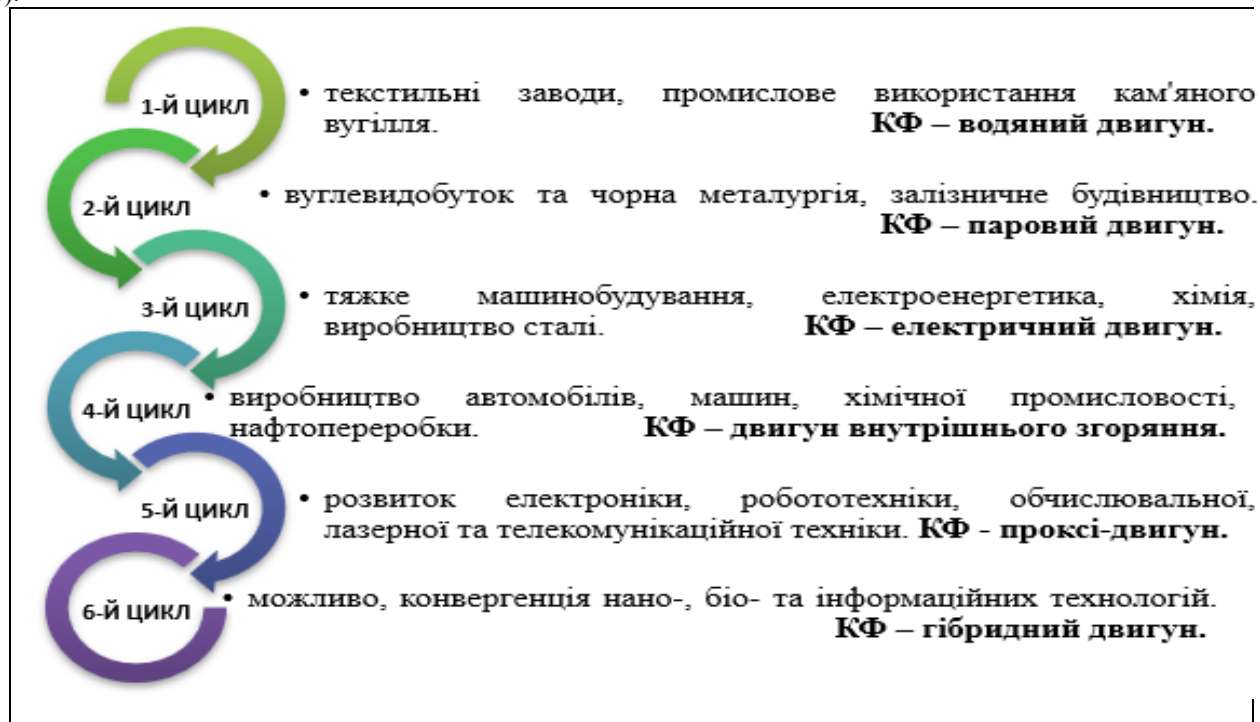


Рис. 1 - Цикли Кондрат'єва

На рис.1 КФ, це ключовий фактор. Для 6 циклу, що відповідає нашому часу, ключовий фактор не визначено, пропонуємо його прийняти як гібридний двигун [3]. За циклами Кондрат'єва з 2025 року почнеться підвищувальна хвиля індустріального розвитку економік, прогнозується конвергенція нано-біо та інформаційних технологій (рис. 1). Звісно, що впроваджуватись мають нові технічні рішення, вакуумні, низькотемпературні, мікрохвильові технології, електродинамічні апарати.

Особливості електродинамічних апаратів в тому, що мікрохвильове поле може впливати на нанорозмірні елементи харчової сировини, змінювати їх структуру. Саме харчові виробництва «працюють» із створеними природою нанорозмірними структурами. Оболонки кліток – 7... 30 нм, полісахариди – 1...10 нм, білки – 10...100 нм. Харчова сировина має нанопори, нанокапіляри, молекули води. Часто завданням харчової технології є руйнування оболонок кліток для підвищення виходу соку, вплив на нанокапіляри для зменшення внутрішнього дифузійного опору, вирішення проблем зневоднення. Тому революційні технологічні перетворення треба починати тут. Більш за те, саме в цьому напрямку вже є успішні напрацювання в ОНТУ [4].

Проблеми традиційних технологій термічної обробки сировини. В Україні більшість підприємств харчової індустрії працюють на застарілому обладнанні, потребують більші витрати енергії та сировинних ресурсів, ніж передові світові виробники. Так, при виробництві екстрактів у відходах залишається суттєва кількість повноцінного цільового компоненту, однак традиційні технології не в змозі їх вилучати. В технологіях пастеризації за 99% енергії витрачається на нагрівання термолабільного продукту, на його псування. При сушінні харчової сировини використовуються тільки методи вилучення вологи у вигляді пари, а це найбільш енерговитратні технології. При роботі із мікрохвильовими апаратами виявлено факти, які суперечать діючим нормам (табл. 1).

Таблиця 1

Результати досліджень мікрохвильових апаратів

№	система	Довідка о параметрах процесу	Факти в умовах дії електромагнітного поля
1	«Деревина – водно - спиртові розчини»	В розчин переходить до 46% деревини	В розчин перейшло 80% деревини
2	«Деревина – водно - спиртові розчини»		Підвищений вміст ароматичних компонентів
3	«зерна кави – вода»	В розчин переходить до 30% цільових компонентів	В екстракті за 40% цільових компонентів
4	«зерна кави – вода»		Підвищений вміст ароматичних компонентів
5	«зерна амаранту - спирт»	Спирт практично не вилучає сквален	В отриманій олії амаранту до 4% схвалену

Таким чином, отримано факти, які суперечать нормам. Але, як казав І.Ньютон, в науках факти важливіші за правил. Пояснення отриманих фактів базуються на запропонованих гіпотезах (табл. 2).

Таблиця 2

Формулювання гіпотез

№	парадокс	гіпотеза
1	При сушінні харчової сировини використовуються тільки методи вилучення вологи у вигляді пари, а це найбільш енерговитратні технології	можливі способи вилучення вологи у паро-рідинній фазі, у вигляді туману
2	При виробництві екстрактів у відходах залишається суттєва кількість повноцінного цільового компоненту, однак традиційні технології не в змозі їх вилучати	Використання електромагнітних джерел енергії дозволить ініціювати бародифузійний потік екстракту із всього об'єму сировини
3	Для інактивації мікроорганізмів використовуються переважно термічні методи. При цьому, 99% підведеної енергії витрачається на нагрівання самого продукту, т.е. на його псування	Можливі способи селективного підведення електромагнітної енергії безпосередньо до мікроорганізмів

Запропоновані гіпотези базуються на організації гібридних процесів. Ініціювання гібридних процесів переносу маси із мікроструктури сировини дозволить:

- при сушінні вилучати частину вологи без перетворення її в пару, знизить енергозатрати й тривалість сушіння та усунути другий період сушіння;

- при екстрагуванні організувати вилучення нерозчинних компонентів;
 - в біотехнологіях управляти процесом життєдіяльності мікроорганізмів.
- За допомогою гібридних процесів суттєво зростає інтенсивність процесів перенесення (табл.3).

Таблиця 3

Порівняння ефективності різних принципів інтенсифікації

№	Принцип інтенсифікації	Ефект інтенсифікації
1	Спеціальна обробка поверхні	До 2 разів
2	Використання ультразвуку	В 2...3 рази
3	Обертання чи вібрація реактору	В 20...30 разів
4	Ініціювання бародифузії	В 100...1000 раз

Інструментом реалізації гібридних процесів є електродинамічні системи та апарати, інтерес до яких динамічно зростає.

Аналіз останніх досліджень і формулювання проблеми. Інтерес до процесів зневоднення харчової сировини є стабільно актуальним. Перспективні схеми сушарок для харчових продуктів з тепловими насосами пропонує фірма ІКЕ [5]. Завдяки замкнутій системі циркуляції повітря ці низькотемпературні сушарки для харчових продуктів забезпечують дбайливе та рівномірне сушіння понад 99% видів продуктів, включаючи фрукти, овочі, м'ясо, морепродукти, трави, чаї, спеції тощо. Сушарки для харчових продуктів з тепловими насосами - ідеально підходять для збереження поживних речовин, кольору та текстури. ІКЕ пропонує повний асортимент сушарок для харчових продуктів з тепловими насосами, включаючи шафові сушарки, сушильні камери та системи безперервного стрічкового сушіння. Доступні індивідуальні конструкції, що відповідають вашій місткості, простору та потребам у продукті.

Вакуумні та сублімаційні установки для сушіння пропонуються на сайтах [6 та 7]. Недоліком сублімаційних технологій є високі витрати енергії.

Що стосується мікрохвильових технологій, то крім китайських сайтів, які мають рекламний характер, в доступній літературі інформації не знайдено. Проте, широко представлено лабораторні дослідження в різних напрямках та в різних країнах. Так, в Туреччині (2024 р.) в технічному університеті досліджувався процес зневоднення цукрози в мікрохвильовому (МХ) вакуумному випарному апараті. В порівнянні із традиційною технологією виявлено суттєва інтенсифікація процесу кристалізації [8]. В Бразилії (2021 р.) проведено зневоднення в умовах МХ поля солоду ячменя [9]. В порівнянні із конвективною сушаркою в діапазоні температур 50-70°C час сушіння в умовах МХ скоротився на порядок, додаткове вакуумування системи суттєво підвищило паропроодуктивність. В США (2024 р.) вчені досліджували вплив МХ енергії та вакууму на процес зневоднення вершків [10]. Температура процесу не перевищувала 65°C, а тиск був від 2,2 до 2,8 кПа. Отримані за такою технологією вершки мали кращі якісні характеристики, більший термін зберігання ніж ті, що отримувались при заморожуванні, чи перетворенням у масло. В Німеччині, в Мюнхені, в технічному університеті (2024 р.) досліджувався вплив МХ поля на процес ліофільного зневоднення мальтодекстрина. Потужність поля змінювалась від 120 до 220 Вт (1,00—1,83 Вт/г) [11]. Температура не перевищувала 40°C. В Тайланді та Малайзії (2022 р.) вивчався процес сублімаційного зневоднення слайсів моркви. (13) при температурах від - 15°C до 40°C. Кінцевий вологовміст готового продукту складав 6%. В Китаю (2022 р.) в сільськогосподарському університеті досліджувались процеси нагрівання рідких продуктів та реологічних систем під дією МХ поля [14]. В [15] наведено критичний огляд та порівняння перспектив різних джерел енергії при обробці рослинної сировини, обґрунтовано позитивний вплив МХ поля, особливо комбінованого впливу МХ та ІЧ випромінювання. Сумісні дослідження Академії наук Китаю та Австралійського університету присвячено обґрунтуванню синергетичних ефектів при дії комбінованих із МХ впливами, наприклад, кавітації та ультразвуку. Такі самі висновки отримано в роботі [16]. Проблеми використання МХ поля та вакууму в процесах концентрування виноградного соку вирішувалась [17]. Отримано високу концентрацію готового продукту – 78 °Brix.

Наведений аналітичний огляд дозволяє зробити наступні висновки.

Інтерес до мікрохвильових технологій динамічно зростає. Підтверджено високу ефективність таких технологій. Але, наразі в доступній літературі представлено дослідження, що проведено на лабораторних установках. Досвід випробувань промислових електродинамічних апаратів відсутній.

В роботі поставлено завдання розробити наукові основи апаратів електродинамічного типу.

Моделювання процесів перенесення в умовах мікрохвильового поля.

Об'єктом дослідження є капілярно - пориста система, а предметом моделювання – процеси зневоднення та екстрагування. Розглядаються традиційна схема конвективного сушіння чи екстрагування (рис. 2,а) та інноваційного, в умовах мікрохвильового (МХ) поля (рис. 2, в). В традиційній схемі градієнти температур (t) та вологості (w) мають різні напрямки. найбільша температура у відкритого торця капіляру. В інноваційній схемі саме в глибині капіляру і найбільша температура, і найбільший вміст вологи. Взаємодія МХ поля та вологи приводить до формування в глибині капіляру парової бульбашки, її зростанню, підвищенню тиску в глибині й бурхливого виходу рідини. Таким чином, замість повільних процесів перенесення маси дифузій-

ними механізмами організується потужний гідравлічний потік, зумовлений гібридним процесом. В результаті отримано бародифузійний ефект, який в задачах зневоднення приводить до виходу із сировини суміші пари та вологи, а в задачах екстрагування – до вилучення як розчинних в екстрагенті компонентів, так і нерозчинних.



а) – традиційна схема; б) – в умовах МХ поля; 1 – тверда фаза; 2 – капіляр.

Рис. 2 - Фізична модель процесу зневоднення

Відмінності в схемі (б) як в джерелі енергії, потужності магнетрону (N), його ККД (η),

$$Q = \Delta U_I + A_I \quad Q) = \eta \times N_E \quad (2)$$

так і в розподіленні потоків енергії, частина - на підвищення внутрішньої енергії (3), частина – на створення роботи (4):

$$\Delta U_I = V \times \rho \times (i_K - i_H) \quad (3) \quad A_I = F \times L = \frac{\Delta P}{S} \times L \quad (4)$$

Так рідина транспортується за рахунок сил тиску.

Робота гібридного процесу визначає формування бародифузійного, пародинамічного потоків. Процес транспортування компонентів із капілярів здійснюється за допомогою електромагнітних джерел енергії. Їх вплив у рівнянні енергії відображається як дія джерел, що рівномірно розподілені у сировині, потужність яких (N) в об'ємі (V)

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{1V} \rho_1}, \quad (5)$$

В рівняннях (1...5) F- сила, що діє на рідину, L- довжина її транспортування, ρ - щільність, i – ентальпія, ΔP – різниця тисків, S - переріз каналу, V - об'єм рідини, t - температура, a – коефіцієнт теплопровідності, τ - час, c - питома теплоємність, r, z, φ - координати.

За принципами діаграми Санкей при використанні парової турбіни конверсія енергії палива в електродинамічних дегідраторах має наступний вигляд:



Рис. 3 – Конверсія енергії палива при виробництві сухих продуктів в електродинамічних дегідраторах

В традиційних сушарках корисна енергія дорівнює 8%, а при використанні газової турбіни корисна енергія в схемі (рис. 3) становить 40%. Апарати електродинамічного типу можна класифікувати на теплообмінні (випарні), масообмінні (сушарки та екстрактори) та біореактори (стерилізатори та культиватори). Довідка за енергетичними показниками тепломасообмінних апаратів в табл. 4. Суттєвий вплив на енергетику мають реверсні потоки (табл. 4).

Розглянемо механізми технології мікрохвильової дегідrataції. Об'ємна обробка сировини здійснюється

при адресної дії безпосередньо на вологу при ГУ II роду. Використовуються електромагнітні генератори мікрохвильового діапазону. Обробка сировини проводиться при температурах 20 – 45 °С. Переваги в можливості отримання концентрованих розчинів (до 92 – 95 %гх.). Обмежуються наявністю в розчинах полярних молекул.

Таблиця 4

Порівняння енергетичних показників

Енерго технологія	Витрата на 1 кг видаленої води	ККД		
	Енергії, J, МДж,	Прямих потоків	Реверсних потоків	Загальний
Сушка традиційна	4 - 10	0,4 – 0,1	0	0,25
Сушка в ЕМП	3	0,5 – 0,3	0	0,4
Випарка традиційна	3	0,5	0	0,5
Двоступеневий дегідратор із ТН	1,5	0,4	0,2	0,6

Відведення пари, підвищення в'язкості розчину здійснюється без перегріву продукту й без зниження інтенсивності енергопідведення. Отримується висококонцентрований продукт без зниження продуктивності апарата та зниження якості концентрату.

Найбільш розповсюдженими є 3 принципи розділення розчинів: переведенням води в пару, в тверду фазу (до льоду) та механічне розділення (наприклад, у центрифугі). Відповідні витрати енергії наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Питомі витрати енергії

№	ПРОЦЕСИ	Витрати енергії на вилучення 1 кг води (МДж/кг)	
		теоретичні	досягнуті
1	переведенням в пару (випарка)	2,5	1,5...2,8
2	переведенням до льоду (кріо)	0,33	1,15
3	Механічною дією (центрифуга)	0,05	0,2

Переведення розчину до більш організованої структури (до льоду) потребує в 7 разів менших витрат енергії, ніж випаровування. Процеси механічного відділення води, без фазових переходів, витрачають ще в 7 разів менших витрат енергії (табл.5). На базі зробленого висновку сформульовано гіпотезу: «Послідовна комбінована дія мікрохвильового поля спроможна вирішити проблему зневоднення й сформувати бародифузійний потік води із об'єму сировини до поверхні із подальшою вилученню поверхневої води механічними засобами». Таким чином, можна використати переваги гібридних процесів бародифузії та механічних принципів зневоднення.

Другий висновок стосується технологій соків. Пропонується гіпотеза: «Обробка рослинної сировини мікрохвильовим полем приводить до руйнування оболонок клітин та виходу парової фази та соку».

Для перевірки гіпотези розроблено експериментальний стенд (рис. 4).

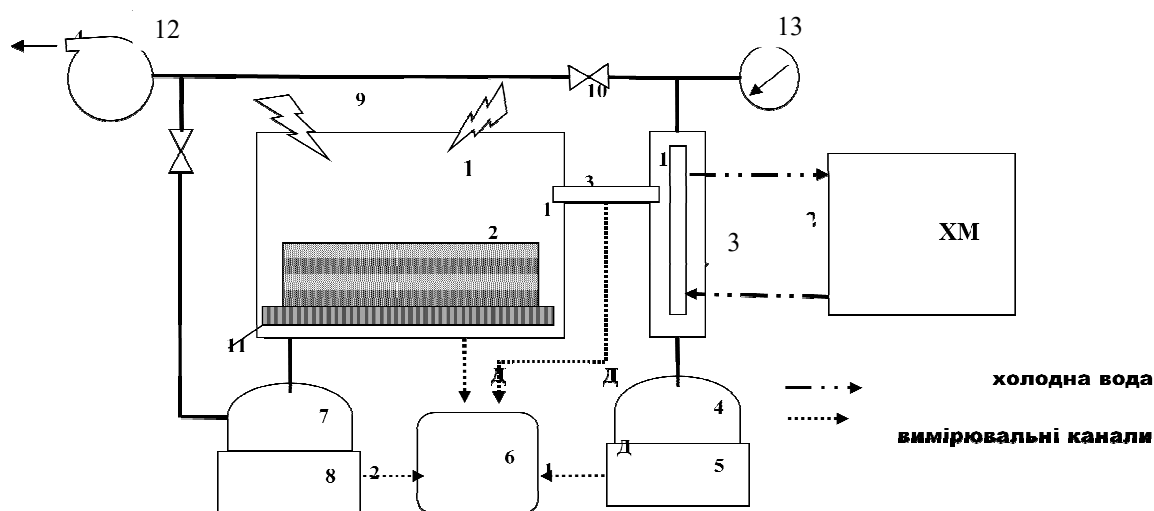


Рис. 4 – Схема стенду для дослідження паро динамічного ефекту

В резонаторній камері (1) на сітчастій перегородці (11) розміщувався продукт (2). Розхід гідролату та соку визначався електронними вагами (5 і 8), (тип ТВЕ-0,21-0,01), температури датчиками Д₃ і Д₄ (тип Dallas DS18B20). Вакуум забезпечувався насосом (12), та контролювався вакуумметром (13). Інформація поступала на планшет CHUWI CW1506 (6). На екрані дисплея відображались термограми, маса вилученого соку й гідролату із камери та поточні значення швидкості цих потоків. Паровий потік із камери (1) конденсувався в холодильнику (3). Об'єктами досліджень визначено кавун та банан (рис. 5).

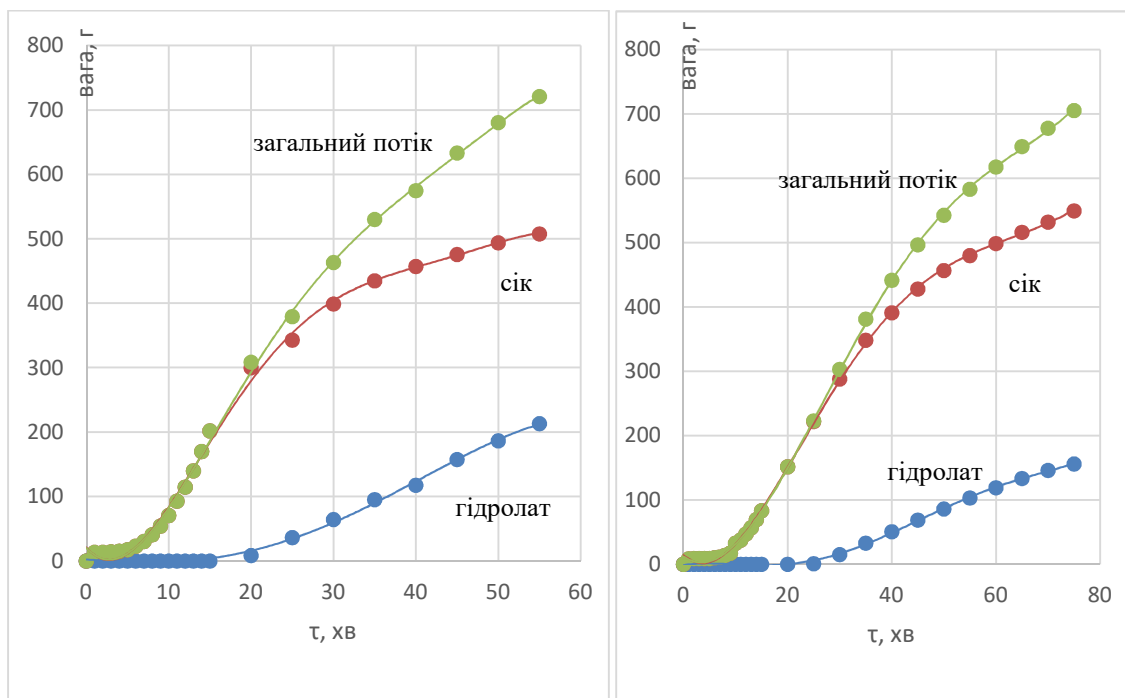


Рис. 5 – Кінетика виходу соку із кавуна та банану

Експерименти свідчать, що соку виходить у 4 рази більше, ніж пари.

Розглянемо можливості гібридних процесів в задачах екстрагування. Об'єктом дослідження вибрано технологію розчинної кави. В традиційних виробництвах шлам після екстрагування не утилізується і викидається. А це створює 2 проблеми. По перше, це суттєве навантаження на довкілля. По друге, він вміщає багато корисних компонентів, які традиційні технології екстрагування не здатні вилучити. При цьому, їх собівартість перевищує саму розчинну каву.

Використання МХ генераторів енергії вирішує ці проблеми. Пропонується після традиційного 1 екстрагування (рис.5) встановити МХ екстрактор 2, який підвищить концентрацію розчину в 2 рази. Отриманий продукт – рідка кава (РІКА) – має суттєві переваги зрівняно із розчинною кавою. Він зберіг ароматичні компоненти, які розчинна кава втратила у розпилювальній сушарці. Отриманий шлам 1 в МХ екстракторі 3 дозволяє вилучити кофеїн, а шлам 2 в МХ екстракторі 4 – кофеоль. Це найбільш коштовний компонент. Після обробки шламу 3 в традиційному екструдері отримуються паливні пелети, теплота згорання яких на рівні деревини.

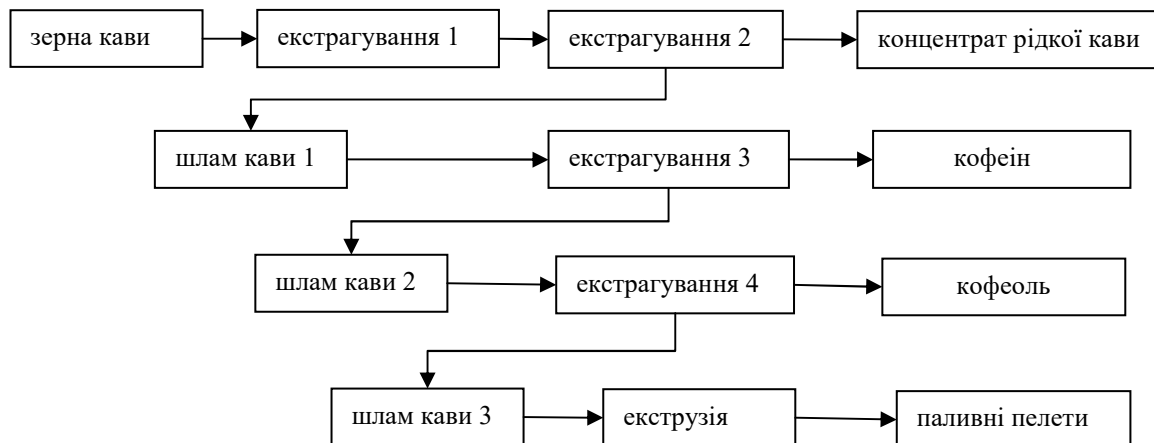


Рис. 5 – Інноваційна схема безвідходної технології переробки зерен кави

Екстрагування 3 та 4 можна проводити у одному апараті при зміні технологічного регламенту.

Таким чином, використання електродинамічних систем може повернути рентабельність традиційним застарілим українським підприємствам переробки зерен кави.

Комплекс проведених робіт по використанню електродинамічних апаратів та систем визначив структури неявних математичних моделей у критеріальному виді:

Активізація та інактивізація мікроорганізмів ($Bu \leq 1$):

$$Bu = N(\zeta V C p \Delta t p)^{-1} \quad (6)$$

при екстрагуванні $1 \leq Bu \leq 1$

$$Bu = N(rwd^2 \rho)^{-1} \quad (8)$$

при сушінні ($Bu \leq 1$)

$$Bu = N(rV \rho)^{-1} \quad (10)$$

$$Fo = A Re^n Pr^m Bu^k \quad (7)$$

$$Sh = A Re^n Sc^m Bu^k \quad (9)$$

$$Sh = A Re^n Sc^m Pe^p Bu^k \quad (11)$$

Константи в рівняннях 6 – 11 для чисел Шервуда (Sh), Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Пекле (Pe), Шмідта (Sc), числа енергетичної дії (Bu) залежать від конкретних завдань та технологій.

Потужність електродинамічних джерел енергії розраховується відповідно числу енергетичної дії (Ви).

Висновки

1. Згідно із глобальною прогнозою моделлю «Римського клубу» до кінця цього століття людство буде турбувати проблеми енергії, екології та їжі. А ці проблеми найбільш концентровані саме у харчових виробництвах.

2. Впровадження інноваційних розробок дозволить перейти до безвідходних технологій переробки харчової сировини й вирішити екологічні проблеми та отримати нові резерви їжі. А біомаса стане основою для паливних елементів.

3. Відома модель розвитку людства «Хвилі Кондрат'єва» визначає, що нові, революційні технології ефективно впроваджуються саме після війн, катаклізмів, пандемій. Що майбутнє за розвитком нано- та біотехнологій. Все це захищає перспективи інноваційного розвитку харчової індустрії у повоєнний час.

4. Мікрохвильовими технологіями в світі широко та успішно займаються і вони мають вагомий перспективи в технологіях переробки рослинної сировини в харчовій й фармацевтичній галузях.

5. Розроблений мікрохвильовий дегідратор забезпечує отримання концентратів при температурах 40 ... 50 ° C та концентрації цільових компонентів в готовому продукті до 90%. В установці реалізована технічна ідея адресної доставки енергії до молекул розчинника. Концентрати відрізняються низькою енергоємністю; високою якістю; низькою собівартістю.

References

1. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth: A report to the Club of Rome*. Universe Books.
2. Руднева, О. (2012). *Хвилі Кондрат'єва*. Retrieved from https://www.banki.ru/wikibank/volnyi_kondrateva/
3. Burdo, O. G., Levitsky, A. P., et al. (2023). Electrodynamics technologies in the ecoindustry of food and pharmaceutical production. *Problemele Energeticii Regionale*, 58(2), 58–71.
4. Zenodo. (n.d.). DOI: 10.5281/zenodo.1217259
5. *Nanofood*. (n.d.). Retrieved from <https://www.nanofood.com.ua>
6. *IKEMachinery*. (n.d.). Retrieved from <https://www.ikemachinery.com/contact.html>
7. *Genyond Machine*. (n.d.). Retrieved from <https://www.genyondmachine.com>
8. *Enderdry*. (n.d.). The steam dryer technology. Retrieved from <https://enderdry.eu/the-steam-dryer-technology/>
9. Ibis, O. I., Bugday, Y. B., Aljurf, B. N., Goksu, A. O., Solmaz, H., Oztog, M. H., & Sumnu, G. (2024). Crystallization of sucrose by using microwave vacuum evaporation. *Journal of Food Engineering*, 365, 111847. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111847>
10. Carvalho, G. R., Monteiro, R. L., Laurindo, J. B., & Augusto, P. E. D. (2021). Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102770. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102770>
11. Dimpler, J., & Moraru, C. I. (2024). Microwave vacuum drying of dairy cream: Processing, reconstitution, and whipping properties of a novel dairy product. *Journal of Dairy Science*, 107(2), 774–789. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23657>
12. Kalinke, I., Roder, J., Unterbuchberger, G., & Kulozik, U. (2025). Microwave-assisted freeze drying: The role of power input and temperature control on energy efficiency and uniformity. *Journal of Food Engineering*, 390, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112410>

13. Sujinda, N., Varith, J., Shamsudin, R., Jaturonglumert, S., & Chamnan, S. (2021). Development of a closed-loop control system for microwave freeze-drying of carrot slices using a dynamic microwave logic control. *Journal of Food Engineering*, 302, 110559. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559>
14. Zeng, S. Y., Li, M. G., Li, G. H., Lv, W. Q., Liao, X. J., & Wang, L. J. (2022). Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>
15. Wu, Y. R., Mu, R. Y., Li, G. H., Li, M. G., & Lv, W. Q. (2022). Research progress in fluid and semifluid microwave heating technology in food processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3436–3454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978>
16. Li, M. G., Zhou, C. S., Wang, B., Zeng, S. Y., Mu, R. Y., Li, G. H., Li, B. Z., & Lv, W. Q. (2023). Research progress and application of ultrasonic- and microwave-assisted food processing technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 3707–3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
17. Zhou, S. C., Chen, W. J., & Fan, K. (2024). Recent advances in combined ultrasound and microwave treatment for improving food processing efficiency and quality: A review. *Food Bioscience*, 58, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683>
18. Hameed, A., Maan, A. A., Khan, M. K. I., Mahmood Khan, I., Niazi, S., Waheed Iqbal, M., Riaz, T., Manzoor, M. F., & Abdalla, M. (2023). Evaporation kinetics and quality attributes of grape juice concentrate as affected by microwave and vacuum processing. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1596–1611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>

INNOVATIVE ENERGY TECHNOLOGIES FOR THE REVIVAL OF UKRAINE'S AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Burdo O. G., SciD, Prof., Burdo A.K., c.t.s., associate professor
Odesa National University of Technology

Abstract. An analysis of predictive models of human development has been carried out, including the concepts of “Club of Rome” and “Kondratiev’s Wave.” The priority of Ukraine’s agro-industrial complex in the post-war recovery of the national economy has been substantiated. Innovative energy technologies are proposed as the key instrument of recovery. Innovative hypotheses have been formulated for the processes of energy-efficient dehydration, extraction, and inactivation of microorganisms. To implement these hypotheses, the principles of hybrid process organization are applied. Mathematical models of these processes have been proposed to describe heat and mass transfer phenomena and to optimize process parameters. The aim of the study is to develop innovative technologies and electrodynamic-type equipment for the processing of plant raw materials, such as electrodynamic extractors, dehydrators, and pasteurizers. The scientific novelty of the work lies in the development of advanced innovative technologies that can replace outdated ones, ensuring the production of higher-quality products with lower energy consumption and reduced environmental impact. The experiments that confirm such possibilities through the implementation of the effects of “mechanodiffusion” and “vapor dynamics” are discussed. It is shown that the organization of hybrid processes is capable of performing the work of transporting liquid through the capillaries of raw materials, which can intensify mass transfer by orders of magnitude and enable the transition to waste-free technologies.

Keywords: predictive models, energy efficiency, food technologies, dehydration, extraction

Список використаної літератури

1. 1. Meadowsetal. Thelimitstogrowth: a report to the club of rome. – 1972.
2. Електронний ресурс: https://www.banki.ru/wiki/bank/volnyi_kondrateva/
3. Burdo O.G., Levitsky A.P. and other.- Electrodynamic Technologies in the Ecoindustry of Food and Pharmaceutical Production. *Problemele Energeticii Regionale*, 2023, vol. 58, no. 2, pp. 58-71.
4. d Zenodo. (n.d.). doi: 10.5281/zenodo.1217259
5. Електронний ресурс: <https://www.nanofood.com.ua>
6. Електронний ресурс: <https://www.ikemachinery.com/contact.html>
7. Електронний ресурс: <https://www.genyondmachine.com>
8. Електронний ресурс: <https://enerdry.eu/the-steam-dryer-technology/>
9. Ibis O.I., Bugday Y.B., Aljurf B.N., Goksu A.O., Solmaz H., Oztop M.H., Sumnu G. Crystallization of Sucrose by Using Microwave Vacuum Evaporation. *Journal of Food Engineering*, 2024, 365, 111847.
10. Carvalho G.R., Monteiro R.L., Laurindo J.B., Augusto P.E.D. Microwave and Microwave-Vacuum Drying as Alternatives to Convective Drying in Barley Malt Processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73, 102770.

11. Dimpler J., Moraru C.I. Microwave vacuum Drying of Dairy Cream: Processing, Reconstitution, and Whipping Properties of a Novel Dairy Product. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107(2), 774—789.
12. Kalinke I., Roder J., Unterbuchberger G., Kulozik U. Microwave-Assisted Freeze Drying: The Role of Power Input and Temperature Control on Energy Efficiency and Uniformity. *Journal of Food Engineering*, 2025, 390, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112410>
13. Sujinda N., Varith J., Shamsudin R., Jaturonglumlert S., Chamnan S. Development of a Closed—Loop Control System for Microwave Freeze—Drying of Carrot Slices Using a Dynamic Microwave Logic Control. *Journal of Food Engineering*, 2021, 302, 110559. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110559>
14. Zeng S.Y., Li M.G., Li G.H., Lv W.Q., Liao X.J., Wang L.J. Innovative Applications, Limitations and Prospects of Energy-Carrying Infrared Radiation, Microwave and Radio Frequency in Agricultural Products Processing. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121, 76—92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.032>
15. Wu Y.R., Mu R.Y., Li G.H., Li M.G., Lv W.Q. Research Progress in Fluid and Semifluid Microwave Heating Technology in Food Processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(4), 3436—3454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978>
16. Li M.G., Zhou C.S., Wang B., Zeng S.Y., Mu R.Y., Li G.H., Li B.Z., Lv W.Q. Research Progress and Application of Ultrasonic— and Microwave—Assisted Food Processing Technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(5), 3707—3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
17. Zhou S.C., Chen W.J., Fan K. Recent Advances in Combined Ultrasound and Microwave Treatment for Improving Food Processing Efficiency and Quality: A Review. *Food Bioscience*, 2024, 58, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103683>
18. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Mahmood Khan I., Niazi S., Waheed Iqbal M., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation Kinetics and Quality Attributes of Grape Juice Concentrate as Affected by Microwave and Vacuum Processing. *International Journal of Food Properties*, 2023, 26(1), 1596—1611.

Отримано в редакцію 09.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 09.06.2025

Approved 02.09.2025