

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРЧОВИХ СИСТЕМ В ІЧ-ПОЛІ

Кравченко О.Ю.¹, аспірант, Молчанов М.Ю.¹, аспірант, Мілінчук К.С.², студентка,
Терзієв С.Г.¹, д.т.н., доцент, Петровський В.В.¹, інженер II категорії.
¹Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна
²Одеський національний університет ім.І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

Анотація. Розглянуто проблеми екоіндустрії та інноваційні шляхи розвитку агропромислової сфери. Показано перспективи технологій глибокої переробки сировинних відходів при виробництві соків та екстрактів. Визначено недоліки традиційного обладнання для зневоднення сировини реологічної структури. Наведено приклади широкого використання в різноманітних задачах зневоднення установок із інфрачервоними джерелами енергії. Сформульовано гіпотезу о перспективах використання електромагнітних джерел енергії в технологіях зневоднення відходів при переробці рослинної сировини. На базі параметричної моделі процесу зневоднення у інфрачервоному полі методами теорії подібності отримано структури критеріальних моделей для рухомого та нерухомого шару сировини. Об'єктами експериментальних досліджень були макуха буряка, цибулі, яблука, дині, абрикосу, полуниці, винограду, банану, сливи та томатна паста. Експериментальний стенд включав холодильну машину, вакуумну систему, джерела електромагнітної енергії, комп'ютеризовану систему збору та обробки інформації. Новими науковими результатами є функціональні залежності по кінетиці зневоднення об'єктів досліджень, термограм процесів та лінії швидкості сушіння. Комплекс проведених експериментальних досліджень визначив перспективність технологій інфрачервоного зневоднення сировини. Запропоновано методологію порівняння енергетичної ефективності технологій із різними по природі джерелами енергії. Порівняння проводиться по ефективності використання 1кг первинного палива. Всі енергетичні потоки нормуються до палива. Наведено енерготехнологічні схеми традиційної конвективної сушарки та інноваційної із інфрачервоними джерелами енергії. Показано, що відсутність в інноваційній сушарці втрат енергії із викидами сушильного агента підвищує ефективність використання енергії палива на 30 %.

Ключові слова: сушіння харчових реологічних систем, сушильні установки з ІЧ – генераторами, кінетика та енергетика сушіння.

Вступ. Сучасна епоха розвитку людства – це епоха екоіндустрії. Інноваційні технології мають вирішувати проблеми ефективного використання енергетичних та сировинних ресурсів при суттєвому зниженні навантаження на довкілля. В першу чергу революційні перетворення в такому напрямку очікуються від харчових технологій, де споживається значна доля енергетичних ресурсів, де до двох третин сировини попадає у відходи. При цьому, часто це дорога сировина, а комерційна вартість вилучення залишкових компонентів у відходах іноді перевищує й сам готовий продукт. Але традиційне обладнання не в змозі вирішити такі проблеми.

В одеському національному технологічному університеті, в лабораторії «Харчові нанотехнології» проводяться комплексні дослідження впровадження принципів нанотехнологій для вирішення задач екоіндустрії, створення безвідходних технологій переробки рослинної сировини [1, 2].

На першому етапі поставлено завдання експериментально визначити ефективність сушіння макухи після отримання овочевих та фруктових соків. Інноваційним кроком в дослідженнях стало використання електромагнітних джерел енергії ІЧ-діапазону. Дослідження проведено на експериментальному стенді, основними вузлами якого були: камера з ІЧ-генератором, касета з сировиною, яка підвищувалась до ваг.

Аналіз літературних джерел та формулювання науково-технічної гіпотези. Наразі, удосконалення технологій сушіння часто базується на використанні ІЧ джерел енергії, як самостійного, чи в комбінації із конвективними, вакуумними, мікрохвильовими та механічними (вібраційними) процесами [3 - 11]. Показано, що сушіння харчових матеріалів в ІЧ-полі потребує менших витрат енергії та часу обробки сировини, забезпечує кращий контроль температури, зменшує вплив на довкілля, просто комбінується із іншими способами сушіння, дозволяє отримати готовий продукт високої якості. Таким чином, ІЧ метод сушіння є перспективний, потенційний метод для зневоднення харчових систем.

Створення конструкцій ІЧ сушарок потребує визначення кінетичних закономірностей, які суттєво залежать від виду сировини. Так, вплив товщини шару апельсину та режимних параметрів процесу встановлено в [3]. Комплексний аналіз впливу швидкості сушіння, питомі витрати енергії, ефективні процеси дифузії та енергія активації для різних харчових систем проведено в [4]. Для сушіння грецького горіху розроблено сушарку дегоріху оброблялись в апараті з тепловим насосом та рекуперацією теплоти (HP) й сушарки з тепловим насосом, ІЧ випромінювані та рекуперацією тепла (IRANP). Визначено, що IRANP забезпечує еконо-

мію енергії 10 % таскорочує час на 20 % в порівнянні з НР [5]. Для зневоднення креветок запропонована та досліджена роторна ІЧ сушарка (RID) [6]. Використання ІЧ сушіння дозволило підвищити енергетичну ефективність на 15 %. Сушарка з використанням ІЧ джерел енергії та вентиляторів досліджена для зневоднення чіпсів куркуми. [7]. Максимальна ефективність сушіння куркуми 25,22 % й мінімальні питомі витрати енергії 1,24 кВтч/кг отримано при 70 °С при швидкості повітря 2 м/с і товщині шару 25 мм. В [8] досліджено ефективний коефіцієнт дифузії при зневодненні груші, який зростає лінійно із підвищенням температури від $1,15 \times 10^{-9}$ до $5,08 \times 10^{-9}$ м²/с. Із співвідношень Арреніуса енергія активації процесу сушіння груші дорівнювала 29,87 кДж/моль. Менші питомі витрати енергії (10,28 кВтч/кг) відповідали більш високим температурам сушіння [8]. Значення ефективних коефіцієнтів дифузії при зневодненні тонких зразків листя кропу [9] складало $6,97 \times 10^{-9}$, $6,84 \times 10^{-9}$ і $8,96 \times 10^{-9}$ м²/с для потужностей ІЧ джерел 1790, 1970 і 2070 Вт/м² відповідно. Дифузійний підхід вважався кращою моделлю, що визначає процес зневоднення листів кропу. В [10] визначено вплив конвективного та ІЧ способів на вміст поліфенолів та антоціанів в плодах: аронії, бузини, вишні, смородині червоної та чорній та інш. Сушіння проводили гарячим воздухом в установці Concept S1060 та ІЧ сушарці Yden CI IR D5. Визначено, що ІЧ сушіння не тільки більш ефективно витрачає енергію, ще й дозволяє в готовому продукті зберегти більше цільових компонентів сировини. В [11] аналізувалась ефективність різних стратегій комбінованих ІЧ та конвективних процесів зневоднення солодкої картоплі. Температура повітря змінювалась від 50 до 70 °С, інтенсивність ІЧ джерел - 1100 Вт/м², швидкість повітря 1,5 м/с, а коефіцієнт пульсації від 1 до 3. Визначено вплив стратегії на швидкість сушіння, час сушіння, ефективну дифузійну вологу, питомі енерговитрати, усадку, кольорові характеристики та фітохімічні сполуки солодкої картоплі.

Аналіз літературних джерел свідчить, що ІЧ метод сушіння є сучасним та прогресивним засобом зневоднення сировини. Але більшість технологій із використанням ІЧ зневоднення в секторі харчових продуктів все ще знаходяться тільки на лабораторній чи експериментальній стадії. Окремі специфічні проблеми зневоднення реологічних харчових систем практично не обговорюються.

Мета наступної роботи – створити енергоефективне обладнання харчових виробництв для сушіння відходів із їх складними реологічними особливостями. Отримати підстави для об'єктивного масштабування подальших можливостей запропонованої технології у потужних комплексах безвідходних харчових виробництв.

В основі запропонованої технології є гіпотеза – «організація процесу зневоднення харчових реологічних систем за умовами об'ємного підведення енергії при граничних умовах 2 роду при узгоджені фізичних характеристик сировини, конструктивних параметрів апарату із параметрами електродинамічної дії дозволить інтенсифікувати процес зневоднення при зменшенні енергетичних витрат».

Подальші дослідження базуються на сучасному уявленню теоретичних засад процесів сушіння [12 - 16], принципах удосконалення енергетики сушіння [17] та досвіді робіт лабораторії «Харчові нанотехнології» ОНТУ [18 - 20].

Основні результати досліджень. Аналітичне розв'язання математичної моделі сушіння наразі не реально [18]. Тому, подальші дослідження направлено на спрощення моделі, приведенню краєвої задачі сушіння до моделі в узагальнених змінних. За основу аналізу прийнято параметричну модель процесу сушіння сировини в ІЧ- полі (рис.1).

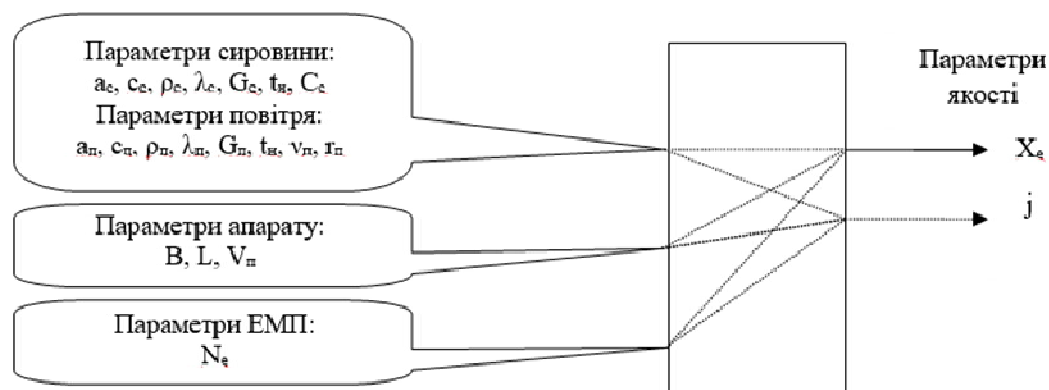


Рис.1 – Параметрична модель

В основі досліджень використано другу теорему подоби Федермана – Бекінгема, яка дає методику коректної постановки експериментів та обробки їх результатів [21]. Прийнято кінетичним коефіцієнтом, який визначає інтенсивність процесу сушіння, вважати коефіцієнт масовіддачі. У задачі, що вирішується, сушіння здійснюється двома потоками: дифузійним і гідродинамічним. Тому, результатом перетворень має стати модель в узагальнених змінних, яка б враховувала специфіку завдання. По-перше, введемо параметр, який

враховує результуючий потік вологи (β_e) ефективний коефіцієнт масовіддачі. Дифузійний потік визначається швидкістю потоку повітря (v), його щільністю (ρ) і в'язкістю (μ); швидкістю руху стрічки транспортера (w) і товщиною шару продукту на стрічці (δ); рушійною силою процесу, тобто. різницею концентрацій (ΔX) та гравітаційною константою (g). Інтенсивність другого потоку залежить від потужності випромінювання (N), питомої теплоти фазового переходу (r), щільності рідини ($\rho_{ж}$) і ширини шару (B). У такій постановці (β_e) враховує і дифузійні, і термічні, і гідродинамічні опори. Зведення основних факторів, які визначають (β_e), наведено у табл.1.

Таблиця 1

Основні параметри процесу сушіння в інфрачервоному полі

Параметр	Символ	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_e	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Товщина шару	δ	м
Щільність повітря	ρ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
В'язкість повітря	μ	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
Швидкість повітря	v	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Коефіцієнт дифузії	D	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
Питома теплота пароутворення	r	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Щільність вологи	$\rho_{ж}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Різниця концентрацій	ΔX	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Гравітаційна постійна	g	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Ширина шару	B	м

Всі ці параметри, представлені в таблиці 1, містять лише три основні розмірності: довжину (L), масу (M) та час (τ).

На основі методу аналізу розмірностей, потрібну функцію β_e представимо залежністю між числами подібності. У даному випадку число змінних $n = 12$, число одиниць виміру $m = 3$. Тоді, згідно з π -теоремою, число безрозмірних комплексів, що описують процес, має дорівнювати $(n - m) = 9$.

Параметри δ, ρ, μ приймаємо загальними для всіх безрозмірних груп. Тоді для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = \delta^a \rho^b \mu^c \beta_e^g \quad (1)$$

Для рівняння (1) розмірна матриця має вигляд:

Таблиця 2

Розмірна матриця

	a	b	c	g	Рівняння
M		1	1		$b + c = 0$ (2)
L	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$ (3)
τ			-1	-1	$-c - g = 0$ (4)

Рішенням системи рівнянь (табл. 2) є: $a = b = -c = g$. Тому:

$$\pi_1 = \frac{\delta \cdot \rho \cdot \beta_e}{\mu} \quad (5)$$

Наступні комплекси визначимо аналогічно шляхом об'єднання δ, ρ, μ з параметрами, що залишилися (табл. 1):

$$\left. \begin{aligned} \pi_2 &= \frac{\Delta X}{\rho}; & \pi_3 &= \frac{\delta^3 \rho^2 g}{\mu^2}; & \pi_4 &= \frac{\delta \rho v}{\mu}; \\ \pi_5 &= \frac{\rho D}{\mu}; & \pi_6 &= \frac{\delta^2 \rho_{ж}^2 r}{\mu^2}; & \pi_7 &= \frac{\delta \rho_{ж}^2 N}{\mu^3}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Геометрію розміщення продукту враховує фактор форми – безрозмірний параметричний комплекс (π_8). Відношення зовнішньодифузійного потоку до внутрішньодифузійного враховується числом Пекле (π_9). Ці

рівняння разом з (5) і системою (6) використовується для пошуку комбінацій, які дадуть структуру рівняння в узагальнених змінних (табл.3).

Таблиця 3

Комбінації параметрів та числа подібності

	параметр	модель	узагальнені числа подоби
1	π_1	$\beta\rho\delta/\mu = \beta\delta/\nu$	безрозмірний коефіцієнт масовіддачі
2	π_4	$Re = \delta\rho\nu/\mu = \delta\nu/\nu$	число Рейнольдса
3	$(\pi_5)^{-1}$	$Sc = \rho D/\mu$	число Шмідта
4	π_5/π_1	$Sh = \beta_2\delta/D$	число Шервуда
5	$\pi_2\pi_3(\pi_8)^3$	$Gr_\delta = g\delta^3\rho\Delta X\mu^{-2}$	дифузійне число Грасгофа
6	π_9	$Pe_\delta = \nu\delta/D$	дифузійне число Пекле
7	$\pi_7(\pi_4\pi_6)^{-1}$	$Bu = N(r\nu\delta^2\rho_{ж})^{-1}$	число енергетичної дії
8	π_8	$F_F = \delta/B$	фактор форми

Число енергетичної дії вперше було запропоновано у роботі [2]. Фізичний зміст числа **Bu** полягає в тому, що встановлюється співвідношення величини витраченої електромагнітної енергії та енергії базового процесу. Такою базовою енергією може вважатися енергія, яка характерна для традиційної технології. Зі зростанням N зростає значення числа **Bu**, зростає різниця тисків, інтенсифікуються викиди з капілярної структури. Це призведе до зростання коефіцієнта βe . Понад те, ці викиди турбулізують і приграничний шар. Отже, число **Bu** може характеризувати як ступінь енергетичного впливу, а й відповідну гідравлічну ситуацію над шаром продукту.

Таким чином, отримуємо:

$$Sh = A (Re)^q (Gr_\delta)^g (Sc)^n (Bu)^p (F_F)^k. \quad (7)$$

У рамках досліджуваного завдання можна знехтувати числом Грасгофа через незначний вплив природної конвекції. При електромагнітному підведенні енергії (при ГУ II роду) повітря виконує завдання виключно дифузійного середовища. У таких умовах великі швидкості повітря стають не тільки не потрібні, а навіть шкідливі, через втрати енергії з сушильним агентом, що відпрацював. Тому процеси сушіння протікають за низьких швидкостей потоку повітря. У умовах показники ступеня n , g і q наближаються до 0. І структура критеріального рівняння спрощується:

$$Sh = A (Pe_\delta)^m (Bu)^p (F_F)^k \quad (8)$$

Розглянемо, як модернізувати рівняння (8) для завдань сушіння в нерухомому шарі при електромагнітних джерелах підведення енергії. З (8) виключається число Пекле. Визначальну роль сушінні грає число енергетичного впливу. На першому етапі досліджень обробку бази експериментальних даних доцільно проводити при окремому обліку впливу товщини оброблюваного шару, безрозмірна форма якого (**H**) може виглядати відношенням поточної товщини **h** до базового значення (наприклад, 1 м). Тоді:

$$Sh = A * Bu^n * H^m * F_F^k \quad (9)$$

Константи в (8) і (9) визначаються при обробці масиву даних, отриманих при комплексних експериментальних дослідженнях. Досліди проведено на універсальному експериментальному стенді (рис.2).

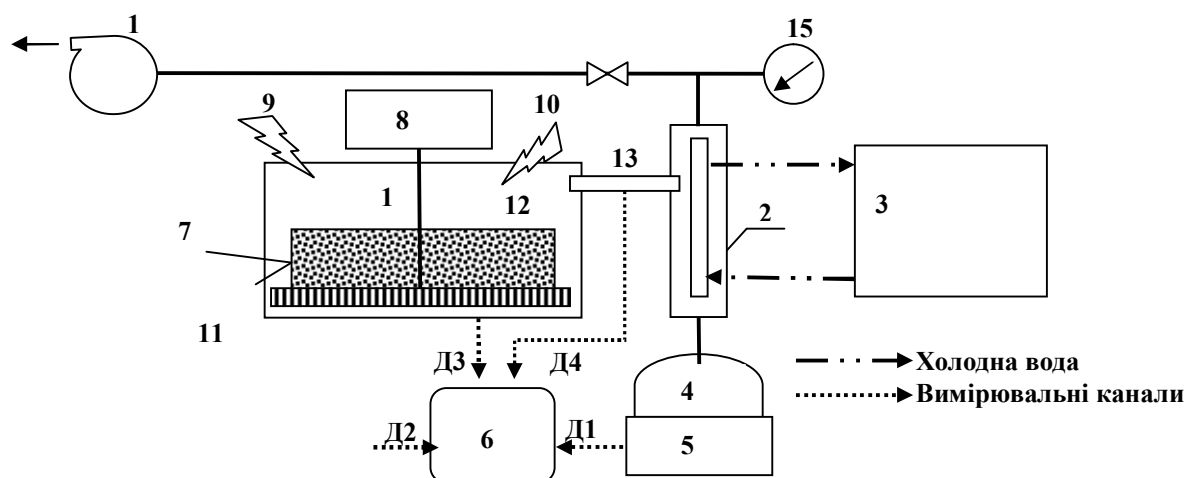


Рис. 2 – Схема універсального стенду для дослідження процесів зневоднення в електромагнітних полях

Основними елементами дослідного стеду (рис.2) є сушильна камера 1, конденсатор 2, холодильна машина 3, ємність для збору конденсату 4, що встановлена на електронних вагах 5. Система комп'ютерного збору інформації 6 реєструє показання термодатчиків, електронних ваг 5 та 8, які фіксують поточну масу сировини 7. Необхідна маса сировини рівномірним шаром розміщується на касеті 11, яку закріплено до вагів 8. В стенді використано ІЧ джерела енергії 9 та 10. Паровий простір сушильної камери 12 каналом 13 з'єднано із конденсатором 2. Стенд передбачає можливість роботи в умовах атмосферного тиску, так і в умовах вакууму, що забезпечується насосом 14 й контролюється вакууметром 15. Сигнал з ваг через інтерфейс поступає до комп'ютера. Усереднені результати вимірів фіксувались у координатах «вага - час», «температура - час». Обробка вимірів визначала вологість сировини та швидкість сушіння (рис.3...5). Згідно параметричної моделі (рис.1) послідовно вивчався вплив потужності поля, товщина шару, тип сировини на кінетику зневоднення макухи.

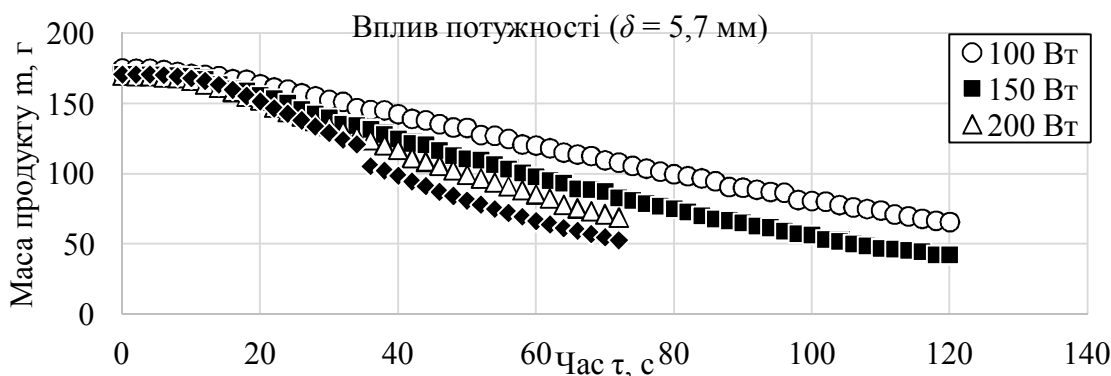


Рис.3 – Кінетика зневоднення макухи яблук в ІЧ- полі

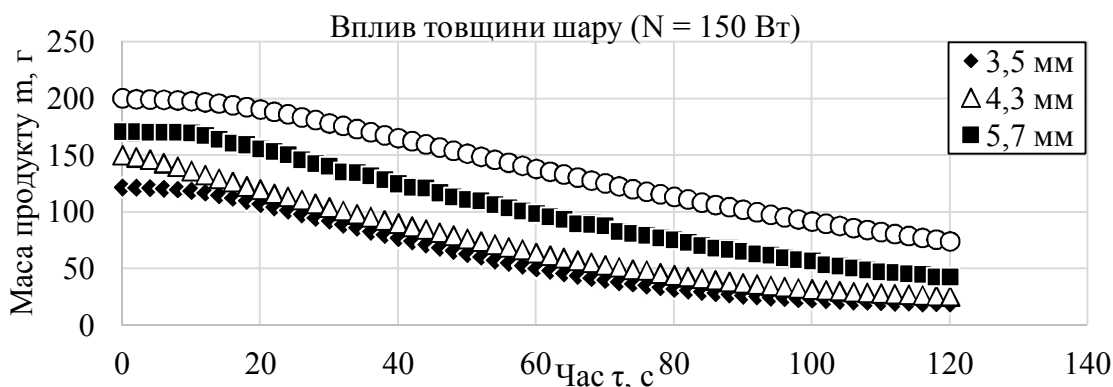


Рис.4 – Кінетика зневоднення макухи яблук в ІЧ- полі

Ефект впливу виду сировини ілюструється кінетичними залежностями (рис.5).

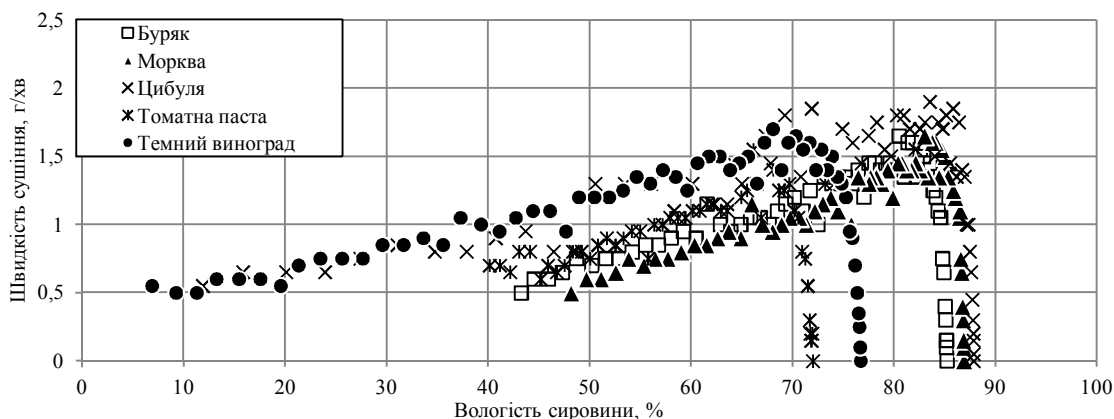


Рис.5 – Кінетика сушіння макухи в нерухомому шарі в умовах ІЧ – поля

Аналіз результатів експериментів наведено в табл.4.

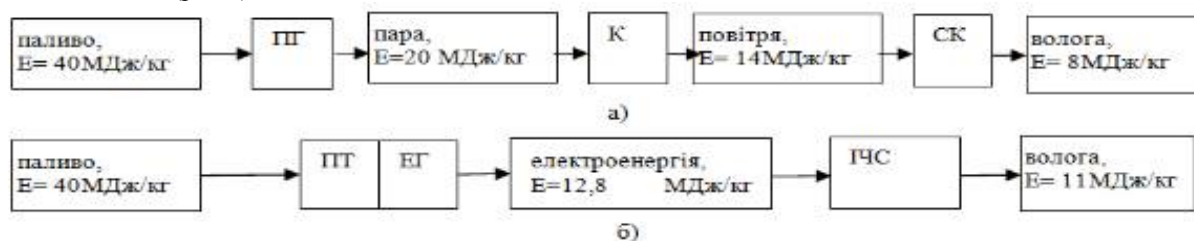
Діапазони зміни параметрів

продукт	Швидкість сушіння, г/хв		Вологість, %	
	Min.	Max.	Max	Min.
Буряк	0,5	1,75	86,9	43,2
Морква	0,5	1,6	87,9	49,6
Цибуля	0,6	1,85	87,9	13,2
Томатна паста	0,65	1,3	72	42,1
Темний виноград	0,55	1,65	76,7	6,9

Аналогічні залежності отримано на пюре яблук, полуниці, банану, сливи, персика, абрикосу, дині.

Наразі, важливим параметром, що характеризує процес зневоднення, вважається енергетика, питомі витрати енергії. Застосування інноваційних джерел ІЧ - енергії потребує й нових підходів до порівняння традиційних та інноваційних технологій зневоднення. В роботі пропонується системний підхід аналізу ефективності використання енергії для технологій із різними джерелами енергії, наприклад, конвективної та електромагнітної.

Об'єктивні результати можна отримати на основі системних досліджень всіх етапів конверсії енергії «первинне паливо – його трансформації у відповідні види енергії – мережа - сировина». За такою схемою проведено аналіз (рис.6).



а) – традиційні конвективні технології сушіння; б) – інноваційна технологія сушіння в ІЧ- полі

Рис. 6 – Конверсія енергії в технологіях зневоднення (всі параметри приведені до 1кг палива)

В традиційних конвективних сушарках енергія палива в парогенераторі (ПГ) перетворюється в енергію пари, а в калорифері (К) – в енергію повітря. В сушильній камері (СК) із кожного кг палива до вологи сировини підводиться 8 МДж.

В схемі інноваційній інфрачервоної сушарці (ІЧС) ефективність використання енергії палива зростає з 8 до 11 МДж, а це на 30 ...35% більше.

Висновки. Досліди показали, що використання ІЧ технологій сушіння – це перспективні шляхи вирішення екологічних проблем та можливість отримання додаткових резервів повноцінної їжі при переробці сировинних відходів консервних виробництв. Важливим доказом перспектив впровадження ІЧ технологій сушіння є практична відсутність втрат енергії із відпрацьованим теплоносієм, що дає змогу суттєво підвищити енергетичну ефективність інноваційної технології.

References

- Burdo, O.G. (2013). Pischevyie nanoenergotehnologii [Food Nanoenergy Technologies]. Kherson (in Russian).
- Burdo O.G. (2005). Nanoscale effects in food-production technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78), 90-96
- Rezvani, Z. et al. (2022) Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8). DOI 10.1111/jfpe.14058. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000783002600001>
- Delfiya, D. et al. (2022). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13810. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000674841000001>
- Karaca Dolgun, Gülşah & Aktaş, Mustafa & Dolgun, Ekin. (2021). Infrared convective drying of walnut with energy-exergy perspective. *Journal of Food Engineering*, 306. DOI 110638. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>
- Al-Hilphy, Asaad & Al-Mtury, Atheer & Al-Iessa, Sajedah & Gavahian, Mohsen & Alshatty, Sabah & Jassim, Muhammad & Mohusen, Zainab. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*. DOI 10.1111/jfpe.13945. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000733187500001>

7. Ganesan, Jeevarathinam & Pandiselvam, Ravi & Pandiarajan, T. & Palaniswamy, Preetha & Krishnakumar, T. & Balakrishnan, Murugesan & Venkatachalam, Thirupathi & Ganapathy, Shunmugam & Damodarasamy, Amirtham. (2022). Design, development, and drying kinetics of infrared-assisted hot air dryer for turmeric slices. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13876. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000705099200001>
8. Araujo, Marcos & Barbosa, Eloiny & Lopes, Roberto & Corrêa, Paulo & Barbosa, Elisa. (2021). Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 44. DOI 10.1111/jfpe.13915. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000707933700001>
9. Tezcan, Derya & Sabanci, Serdal & Çevik, Mutlu & Çokgezme, Ömer & İcier, Filiz. (2020). Infrared drying of dill leaves: Drying characteristics, temperature distributions, performance analyses and colour changes. *Food Science and Technology International*. 27. DOI 108201322092914. 10.1177/1082013220929142. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000538276500001>
10. Mendelova, Andrea & Mendel, Ľubomír & Solgajová, Miriam & Kolesárová, Anna & Mareček, Ján & Zelenáková, Lucia. (2022). COMPARISON OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FRUIT DRYING METHODS ON THE CONTENT OF SELECTED BIOACTIVE SUBSTANCES. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. e9223. DOI 10.55251/jmbfs.9223. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000869066200001>
11. Indiarto, Rossi & Inayah, Devia & Wulansari, Wulansari & Ramadhani, Abbya & Yarlina, Vira & Pangawikan, Aldila. (2021). Chocolate's Blooming Phenomenon: A Brief Review of The Formation Process and Its Influencing Factors. 9. 1156-1161. DOI 10.30534/ijeter/2021/21982021. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000447581200010>
12. Lyikov A.V. (1971). *Teplomassobmen (spravochnik)*. [Heat and Mass Transfer (Handbook)] M.: Energiya (in Russian).
13. Snezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2021). *Energoefektivnist protsesiv sushynnya. Tematichnyy zbirnik statey u dvoh tomah*. [Energy efficiency of drying processes. Thematic collection of articles in two volumes] Vol. 1. Kyiv. (in Ukrainian).
14. Potapov V.O., Pogozhih M.I. (2003). *Molekulyarno kinetichnyy metod analizu kinetiki sushynnya koloYidnih kapillyarno poruvatih materialiv*. [Molecular kinetic method of analysis of drying kinetics of colloidal capillary porous materials] Scientific Works, 26. 270-274. (in Ukrainian).
15. Grishin M.A., Atanazevich V.I., Semenov Yu.G. *Ustanovki dlya sushki pischevykh produktov: spravochnik // Agropromizdat* [Food Dryers: Handbook] - M., 1989. (in Russian).
16. Planovskiy A.N., Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. (1979). *Sushka dispersnykh materialov v himicheskoy promyshlennosti*. [Drying of particulate materials in the chemical industry] – Moscow (in Russian).
17. Snezhkin Yu.F., Boryak L.A., Havin A.A. (2004). *Energosberegayushchie teplotnologii proizvodstva pischevykh poroshkov iz vtorichnykh syrevykh resursov*. [Energy-saving heat technologies for the production of food powders from secondary raw materials] Kyiv: Naukova dumka. (in Russian).
18. Burdo O. G. (2010). *Evolutsiya sushilnykh ustanovok* [The evolution of dryers]. Odessa: Poligraf (in Russian).
19. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Scherbich M.V., Akimov A.V., Poyan A.S. *Innovatika energeticheskikh tehnologiy degidratatsii i ekstragirovaniya pischevogo syrya*. [Innovation of energy technologies for dehydration and extraction of food raw materials] Problemele Energeticii regionale. (in Russian).
20. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Scherbich M.V. *Sistema innovatsionnykh energotekhnologiy obezvozhhvaniya pischevogo syrya*. [System of innovative energy technologies for dehydration of food raw materials.] Problemele energeticii regionale. (in Russian).
21. Guhman A.A. (1974). *Primenenie teorii podobiya k issledovaniyu protsessov teplo- i massoobmena*. [Application of the theory of similarity to the study of heat and mass transfer processes] M.: Vysshaya shkola. (in Russian).

RESEARCH OF RHEOLOGICAL DRYING PROCESSES OF FOOD SYSTEMS IN THE FIELD OF IC

Kravchenko O.Yu.¹, graduate student, Molchanov M.Yu.¹, graduate student, Milinchuk K.S.², student, Terziev S.G.¹, d.t.s., associate professor, Petrovsky V.V.¹, engineer of the II category.

¹Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

²Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

Abstract. The problems of eco-industry and innovative ways of development of the agro-industrial sphere are considered. The perspective of technologies of deep processing of raw materials in the production of juices and extracts is shown. Disadvantages of traditional equipment for dehydration of rheological structured raw materials were revealed. Examples of the wide use of drying units with infrared energy sources in various tasks are given. A hypothesis is formulated about the prospects of using sources of electromagnetic energy in waste dehydration tech-

nologies during the processing of vegetable raw materials. On the basis of the parametric model of the dehydration process in the infrared field, the structures of criterion models for the moving and stationary layers of raw materials were obtained using the methods of similarity theory. The objects of experimental research were beets, onion, apples, melon, apricots, strawberries, grapes, bananas, plums and tomato paste. The experimental stand included a refrigerating machine, a vacuum system, sources of electromagnetic energy, and a computerized system for collecting and processing information. The new scientific results are the functional dependences of the dehydration kinetics of the studied objects, the thermogram of the processes and the drying speed line. The set of conducted experimental studies determined the prospects of the technology of infrared dehydration of raw materials. A methodology for comparing the energy efficiency of technologies with different energy sources is proposed. The comparison is based on the efficiency of using 1 kg of the main fuel. All energy flows are allocated to fuel. The energy technological schemes of the traditional convective dryer and the innovative one with infrared energy sources are presented. It is shown that the absence of energy losses with drying agent emissions in the innovative dryer increases the efficiency of fuel energy use by 30%.

Key words: drying of food rheological systems, drying plants with IR generators, drying kinetics and energetics.

Список використаної літератури

1. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
2. Burdo O.G. (2005). Nanoscale effects in food-production technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78), 90-96
3. Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. Rezvani, Z, Morteza pour, H, Ameri, M, Akhavan, HR, Arslan, S. of *Engineering Physics and Thermophysics*, 1(78) DOI 10.1111/jfpe.14058. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000783002600001>
4. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. Автор: Delfiya, D. S. A., Prashob, K, Murali, S, Alfiya, P.V., Samuel, M.P., Pandiselvam, R. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13810. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000674841000001>
5. Karaca Dolgun, Gülşah & Aktaş, Mustafa & Dolgun, Ekin. (2021). Infrared convective drying of walnut with energy-exergy perspective. *Journal of Food Engineering*, 306. DOI 110638. 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>
6. Al-Hilphy, Asaad & Al-Mtury, Atheer & Al-Iessa, Sajedah & Gavahian, Mohsen & Alshatty, Sabah & Jassim, Muhammad & Mohusen, Zainab. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*. DOI 10.1111/jfpe.13945. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000733187500001>
7. Ganesan, Jeevarathinam & Pandiselvam, Ravi & Pandiarajan, T. & Palaniswamy, Preetha & Krishnakumar, T. & Balakrishnan, Murugesan & Venkatachalam, Thirupathi & Ganapathy, Shunmugam & Damodarasamy, Amirtham. (2022). Design, development, and drying kinetics of infrared-assisted hot air dryer for turmeric slices. *Journal of Food Process Engineering*. 45. DOI 10.1111/jfpe.13876. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000705099200001>
8. Araujo, Marcos & Barbosa, Eloiny & Lopes, Roberto & Corrêa, Paulo & Barbosa, Elisa. (2021). Infrared drying of pear slices: Drying kinetics, energy, and exergy analysis. *Journal of Food Process Engineering*. 44. DOI 10.1111/jfpe.13915. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000707933700001>
9. Tezcan, Derya & Sabanci, Serdal & Çevik, Mutlu & Çokgezme, Ömer & Icier, Filiz. (2020). Infrared drying of dill leaves: Drying characteristics, temperature distributions, performance analyses and colour changes. *Food Science and Technology International*. 27. DOI 108201322092914. 10.1177/1082013220929142. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000538276500001>
10. Mendelova, Andrea & Mendel, Eubomír & Solgajová, Miriam & Kolesárová, Anna & Mareček, Ján & Zelenáková, Lucia. (2022). COMPARISON OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FRUIT DRYING METHODS ON THE CONTENT OF SELECTED BIOACTIVE SUBSTANCES. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. e9223. DOI 10.55251/jmbfs.9223. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000869066200001>
11. Indiarto, Rossi & Inayah, Devia & Wulansari, Wulansari & Ramadhani, Abbya & Yarlina, Vira & Pangawikan, Aldila. (2021). Chocolate's Blooming Phenomenon: A Brief Review of The Formation Process and Its Influencing Factors. 9. 1156-1161. DOI 10.30534/ijeter/2021/21982021. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000447581200010>
12. Лыков А.В. Тепломассообмен (справочник). М.: Энергия, 1971. – 560с.
13. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Енергоефективність процесів сушіння. Тематичний збірник статей у двох томах. Том 1. Київ: 2021. – 343с.
14. Потапов В.О., Погужих М.І. Молекулярно кінетичний метод аналізу кінетики сушіння колоїдних капілярно поруватих матеріалів. // Наук.праціОНАХТ.-Одеса: 2003.-Вип.26.-С.270-274.

15. Гришин М.А., Атаназевич В.И., Семенов Ю.Г. Установки для сушки пищевых продуктов: справочник // Агропромиздат- М., 1989.-
16. Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М., 1979. – 287 с.
17. Снежкин Ю.Ф., Борjak Л.А., Хавин А.А. Энергосберегающие теплотехнологии производства пищевых- порошков из вторичных сырьевых ресурсов. Київ: Наукова думка, 2004. 228 с.
18. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010. – 368с.
19. Бурдо О.Г., Сиротюк И.В., Щербич М.В., Акимов А.В., Поян А.С. Инноватика энергетических технологий дегидратации и экстрагирования пищевого сырья. *Problemele energeticii regionale*.
20. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Гаврилов А.В., Сиротюк И.В., Щербич М.В. Система инновационных энерго- технологий обезвоживания пищевого сырья *Problemele energeticii regionale*
21. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1974. – 328с

Отримано в редакцію 22.05.2022
Прийнято до друку 21.09.2022

Received 22.05.2022
Approved 21.09.2022