

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-12>

УДК 66.047.3.085.1; 66.047-912

О. А. Новохат, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

Ю. А. Злоба, аспірантка

ORCID: 0009-0002-6391-2712

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: tyshkojulia287@gmail.com

УЛЬТРАЗВУКОВА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАРОТИНОВМІСНОЇ СИРОВИНИ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Анотація. У статті узагальнено літературні дані щодо інтенсифікації сушіння каротиновмісної рослинної сировини з урахуванням термолабільності β -каротину. Показано, що традиційні високотемпературні способи сушіння можуть знижувати вміст каротиноїдів і погіршувати якість продукту. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих технологій з ультразвуковою інтенсифікацією, які можуть підвищувати інтенсивність масопереносу без істотного зростання температури процесу. Запропоновано фізичну модель, що враховує взаємопов'язані теплові й масообмінні явища та вплив ультразвуку на структуру матеріалу. Показано перспективність використання ультразвуку для скорочення тривалості сушіння, зниження енерговитрат і збереження біологічної цінності каротиновмісної сировини.

Ключові слова: сушіння, конвективне сушіння, каротиновмісна сировина, β -каротин, ультразвук, масоперенос, ефективний коефіцієнт дифузії, енергоефективність, кінетика сушіння.

Постановка проблеми. Каротиновмісна рослинна сировина, до якої належать морква, гарбуз, батат, абрикос, обліпиха, томати та інші плоди й овочі з жовто-оранжевим або червоним забарвленням, є важливим джерелом каротиноїдів, передусім β -каротину. Останній належить до провітамінів А і в організмі людини перетворюється на активний вітамін А; крім того, каротиноїди виконують антиоксидантні функції та беруть участь у формуванні функціональної цінності харчових продуктів [1; 2]. Саме тому каротиновмісна сировина розглядається не лише як традиційний компонент харчування, а і як перспективна база для виробництва функціональних продуктів, натуральних барвників, порошків, концентратів та добавок оздоровчого призначення [2; 5].

Водночас така сировина характеризується високою вологістю, сезонністю надходження, значною чутливістю до мікробіологічного псування та обмеженим строком зберігання у свіжому вигляді. Тому одним із ключових технологічних способів її консервування є сушіння, яке дає змогу зменшити вміст води, масу й об'єм продукту, спростити логістику, знизити витрати на зберігання та створити стабільну за якістю сировинну основу для подальшого використання в харчових технологіях [3–5]. Українські дослідники також відзначають доцільність переробки каротиновмісної сировини у сухі порошки та добавки саме через труднощі тривалого зберігання свіжих овочів і плодів та потребу збереження β -каротину в перероблених продуктах [3–5].

Однак сушіння каротиновмісної сировини пов'язане з низкою технологічних проблем. Каротиноїди належать до термолабільних і окиснюваних сполук; вони чутливі до підвищеної температури, кисню у повітрі, тривалого теплового впливу та світла. Під час зневоднення можливі ізомеризація, термоокиснювальна деструкція та зміна кольорових характеристик матеріалу, що призводить до зниження біологічної цінності, погіршення споживчих властивостей і втрати



технологічної привабливості готового продукту [1; 9; 10]. Для моркви та спорідненої сировини показано, що навіть за використання сучасних способів сушіння вміст каротиноїдів істотно залежить від режиму обробки, а надмірний термічний вплив знижує їх збереженість [9; 10].

На практиці найпоширенішим способом сушіння є конвективний. Його перевагами є конструктивна простота та відносна доступність обладнання. При цьому як теплоносієм зазвичай використовується повітря. Однак для конвективного способу характерні значна тривалість процесу, високі питомі енерговитрати, тривалий контакт продукту з нагрітим повітрям і киснем, а відтак і підвищений ризик руйнування каротиноїдів, потемніння та небажані структурні зміни [3; 4; 6; 12]. Наукові праці в українських виданнях із сушіння морквяних вичавок і каротиновмісної сировини також підкреслюють, що вибір режиму повинен узгоджуватися не лише з продуктивністю процесу, а і зі збереженням β -каротину як цільового показника якості [3–6].

Сучасний розвиток сушильних технологій спрямований на розв'язання суперечності між двома вимогами: з одного боку, необхідно інтенсифікувати масообмін, скоротити тривалість сушіння і зменшити енергоспоживання; з іншого – забезпечити максимальне збереження термолабільних біологічно активних речовин, насамперед каротиноїдів. Саме тому актуальним напрямом є застосування комбінованих та енергетично керованих способів сушіння – вакуумного, мікрохвильового, інфрачервоного, сублімаційного та ультразвукового [9; 14–16].

За сучасними даними, перспективним засобом інтенсифікації зневоднення є ультразвук, який може прискорювати перенесення вологи, знижувати внутрішній дифузійний опір і, в окремих випадках, сприяти кращому збереженню кольору, текстури та каротиноїдів у висушеній сировині [11–15].

Отже, наукова проблема полягає в обґрунтованому виборі таких режимів і способів сушіння каротиновмісної сировини, які забезпечували б одночасно високу інтенсивність вологовидалення, енергоощадність процесу та максимальне збереження β -каротину й інших цінних компонентів. Практичне значення цієї проблеми пов'язане з необхідністю створення стабільної високоякісної сушеної сировини для харчової, дієтичної та переробної промисловості [3; 5; 10–15].

Аналіз досліджень. У сучасних дослідженнях сушіння рослинної сировини простежуються дві головні тенденції: по-перше, пошук способів скорочення тривалості процесу та зниження енерговитрат; по-друге, забезпечення вищої збереженості біологічно активних речовин і природного кольору продукту.

Для каротиновмісної сировини ця проблема є особливо важливою, оскільки саме каротиноїди визначають не лише харчову, а й функціонально-технологічну цінність готового продукту [1; 9; 10]. Огляди літературних джерел показують, що вплив способу сушіння на якість моркви та інших каротиновмісних об'єктів є дуже суттєвим: різні технології по-різному змінюють вміст каротиноїдів, активність антиоксидантів, колір, текстуру та здатність до регідратації [9; 10].

У традиційному конвективному сушінні переважає теплопередача від нагрітого повітря до поверхні матеріалу з подальшим внутрішнім перенесенням вологи. Незважаючи на технологічну простоту, цей спосіб характеризується тривалим перебуванням сировини в зоні підвищених температур і контактом з киснем, що посилює деградацію пігментів [3; 4; 9; 15]. Вітчизняні дослідження морквяних вичавок показали, що при виборі режимів сушіння одним із визначальних показників якості виступає саме вміст β -каротину в кінцевому продукті [3; 4]. У працях українських науковців також наголошено, що для каротиновмісної сировини важливо уникати надмірного теплового навантаження та карамелізації цукрів, а температурний режим повинен бути компромісом між швидкістю процесу та стабільністю пігментів [4; 5; 15].

Порівняльні дослідження сучасних способів сушіння свідчать, що вакуумні, мікрохвильові, мікрохвильово-вакуумні та сублімаційні методи часто дають кращі результати щодо якості, ніж звичайне конвективне сушіння. Зокрема, для сушеної моркви було показано, що ліофілі-



зація забезпечує дуже низьку активність води та високу суху речовину, а мікрохвильово-вакуумне сушіння може забезпечувати підвищений вміст каротиноїдів і високу антиоксидантну активність порівняно з іншими режимами [9; 10; 16]. Разом із тим ліофілізація залишається дорогою та тривалою, а мікрохвильові методи потребують ретельного керування режимами через ризик локального перегріву та нерівномірного висушування [9; 10].

Зважаючи на це дедалі більшу увагу привертає застосування ультразвукового впливу під час сушіння або ультразвукова попередня обробка сировини перед сушінням. Механізм дії ультразвуку пов'язують з кавітаційними явищами, мікроструменями, періодичним стисканням і розрідженням середовища, а також із так званим «губчастим ефектом», завдяки якому структура рослинної тканини частково розкривається, а всередині матеріалу формуються додаткові шляхи для переносу вологи. Наслідком цього є зменшення внутрішнього дифузійного опору, прискорення масопереносу та скорочення тривалості сушіння [11–14]. Саме така фізична природа процесу пояснює, чому ультразвук здебільшого розглядають не як самостійний спосіб зневоднення, а як інструмент інтенсифікації вже наявних сушільних технологій [11; 14].

Позитивні результати застосування ультразвуку для каротиновмісної сировини нині підтверджені низкою робіт. У дослідженні гібридного ротаційного сушіння моркви показано, що додавання ультразвуку підвищувало швидкість сушіння приблизно на 13 %, а комбінація мікрохвиль та ультразвуку – до 140 % порівняно з базовим конвективним режимом. Крім того, ультразвук зменшував різницю кольору висушеного продукту, тобто сприяв кращому збереженню зовнішнього вигляду [11].

У роботі щодо поєднання ультразвукової попередньої обробки з електрогідродинамічним сушінням моркви встановлено істотне прискорення сушіння, покращення регідратаційної здатності та найкраще збереження кольору за оптимального рівня ультразвукової потужності. Важливо, що за цих умов фіксували менше 6-метил-5-гептен-2-ону – продукту деградації каротиноїдів, що опосередковано свідчить про кращу їх збереженість. [12].

Отримано результати і в більш ранніх фундаментальних роботах. Для моркви показано, що сушіння з використанням потужного ультразвуку забезпечувало вищу збереженість вітаміну С та β -каротину, ніж звичайне конвективне сушіння. Для окремих режимів збереженість β -каротину сягала 96–98 %, що є одним із найвагоміших аргументів на користь цієї технології [13]. Новіші дослідження також демонструють, що оптимізація частоти, потужності й тривалості ультразвукової обробки може підвищувати утримання β -каротину, фенольних речовин і флавоноїдів на 10–50 % залежно від виду сировини та умов сушіння [14]. У науковій публікації 2025 року, присвяченій сушінню моркви після ультразвукової попередньої обробки, зафіксовано підвищений вміст β -каротину в порівнянні із сушінням гарячим повітрям і сонячним сушінням, а також поліпшення фізичних властивостей продукту [16].

Окрему цінність ультразвуку становить те, що він дає змогу інтенсифікувати сушіння без пропорційного підвищення температури процесу. Саме це є критично важливим для каротиновмісної сировини, де підвищення температури хоч і пришвидшує видалення вологи, але одночасно активізує руйнування пігментів. Тому ультразвук може виконувати роль «м'якого» інтенсифікатора масопереносу: прискорення сушіння досягається не стільки за рахунок сильнішого термічного впливу, скільки через структурні зміни тканини та посилення внутрішньої дифузії [11–14]. Це робить технологію особливо перспективною для моркви, гарбуза, абрикоса, томатів та іншої сировини, де збереження природного забарвлення прямо пов'язане зі збереженням каротиноїдного комплексу [6–9; 14].

Водночас результати літературного аналізу показують, що універсального режиму ультразвукового сушіння не існує. Ефект залежить від виду сировини, геометрії частинок, початкової вологості, наявності попередньої обробки, потужності та частоти ультразвуку, а також від



поєднання з іншими способами підведення енергії. Для частини систем ультразвук дає помірне прискорення процесу, а найбільший ефект спостерігається в комбінованих схемах: поєднання впливу ультразвуку та мікрохвиль, ультразвуку та вакууму, ультразвуку та електрогідродинамічного сушіння [11; 12; 16]. Тому необхідні подальші дослідження для вибору оптимальних комбінованих режимів для конкретних видів каротиновмісної сировини з урахуванням критеріїв тривалості, енергоємності, кольору та вмісту β -каротину [13–16].

Отже, аналіз сучасних міжнародних та українських досліджень дає підстави стверджувати, що найперспективнішим напрямом удосконалення технології сушіння каротиновмісної сировини є використання комбінованих енергоощадних методів з ультразвуковою інтенсифікацією. Такий підхід дозволяє скоротити тривалість зневоднення, поліпшити масоперенос, знизити ризик перегріву продукту, краще зберегти колір, регідратаційні властивості та β -каротин. Саме тому розроблення та наукове обґрунтування режимів ультразвукового сушіння каротиновмісної сировини є актуальним завданням сучасної харчової технології [3; 4; 14–16].

Формулювання мети статті. Метою статті є узагальнення літературних даних щодо застосування ультразвуку для інтенсифікації сушіння каротиновмісної сировини та формування фізичної моделі процесу, що враховує взаємопов'язані теплові й масообмінні явища.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано літературні дані щодо впливу ультразвуку на кінетику сушіння, інтенсивність масопереносу, питомі енерговитрати та збереження каротиноїдів у готовому продукті.

Основна частина.

1. Теоретичні основи тепломасопереносу з урахуванням ультразвукового впливу:

Процес сушіння описується як взаємодія теплопереносу та масопереносу. Теоретичною базою є рівняння теплопровідності та другий закон Фіка [2; 10].

Рівняння теплового балансу матеріалу має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T - \rho r_v \left| \frac{\partial W}{\partial \tau} \right| + q_{us}, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T – температура, К ; τ – час, с ; λ – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; r_v – теплота випаровування, $\text{Дж}/\text{кг}$; W – вологовміст, $\text{кг}/\text{кг}$; q_{us} – додаткове джерело тепла від ультразвуку, Вт .

У рівнянні (1) член q_{us} враховує тепловий ефект від впливу ультразвуку, пов'язаний із кавітаційними процесами [11; 14].

Гранична умова теплообміну:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{eff} (T_s - T_\infty), \quad (2)$$

де α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_s – температура поверхні, К ; T_∞ – температура середовища, К .

Ефективний коефіцієнт тепловіддачі визначається залежністю:

$$\alpha_{eff} = \alpha (1 + k_\alpha I_{us}), \quad (3)$$

де α – базовий коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; k_α – емпіричний коефіцієнт впливу ультразвуку, $\text{м}^2/\text{Вт}$; I_{us} – інтенсивність ультразвуку, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Згідно з формулою (3) ультразвуковий вплив сприяє зменшенню опору пограничного шару та підвищенню інтенсивності теплообміну [11; 13; 14].

Рівняння дифузії:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla W), \quad (4)$$



де W – вологовміст матеріалу, кг/кг; τ – час, с; ∇ – диференціальний оператор просторової зміни величини, 1/м; D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с.

Ефективний коефіцієнт дифузії визначається залежністю (5):

$$D_{eff} = D_0(1 + k_D I_{us}), \quad (5)$$

де D_0 – базовий коефіцієнт дифузії без ультразвукового впливу, м²/с; k_D – коефіцієнт впливу ультразвуку, м²/Вт; I_{us} – інтенсивність ультразвуку, Вт/м².

Згідно з формулою (5) ультразвуковий вплив може сприяти збільшенню ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} , що спричинене зменшенням внутрішнього дифузійного опору [11; 13; 14; 17]. Тоді для тонкого шару:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right), \quad (6)$$

де D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с; τ – час, с; L – характерний розмір матеріалу, який для плоского шару дорівнює половині товщини зразка, м;

Безрозмірний вологовміст визначається як:

$$MR = \frac{W - W_{eq}}{W_0 - W_{eq}}, \quad (7)$$

де W – поточний вологовміст, кг/кг; W_0 – початковий вологовміст, кг/кг; W_{eq} – рівноважний вологовміст, кг/кг.

Інтенсивність процесу характеризується числом Фур'є:

$$Fo = \frac{D_{eff} \tau}{L^2}, \quad (8)$$

де D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с; τ – час, с; L – характерний розмір матеріалу, який для плоского шару дорівнює половині товщини зразка, м.

Зростання числа Фур'є Fo свідчить про інтенсифікацію внутрішнього масопереносу [2; 10; 11].

2. Кінетика сушіння та збереження каротиноїдів

Для опису кінетики використовується модель Пейджа:

$$MR = \exp(-k\tau^n), \quad (9)$$

де MR – безрозмірний вологовміст; k – емпіричний коефіцієнт швидкості сушіння, с⁻¹; τ – час, с; n – безрозмірний емпіричний показник.

Коефіцієнт швидкості сушіння k у формулі (9) на практиці зростає при використанні ультразвуку, що свідчить про інтенсифікацію процесу [11; 14; 16; 17].

Швидкість сушіння визначається рівнянням:

$$v_d = -\frac{dW}{d\tau}, \quad (10)$$

де W – поточний вологовміст, кг/кг; τ – час, с.

Зменшення тривалості процесу знижує сумарне теплове навантаження на матеріал, що може сприяти кращому збереженню β -каротину. Це узгоджується з даними експериментальних досліджень [13; 14; 16].

3. Аналіз енергоефективності процесу

Енергоефективність процесу сушіння є одним із визначальних критеріїв вибору технології переробки каротиномісної сировини. Аналіз сучасних досліджень показує, що різні способи сушіння суттєво відрізняються за питомими витратами енергії на видалення 1 кг вологи [9; 12; 16].



Найбільш енергоємним є сублимаційне сушіння, питомі витрати якого досягають 7–10 кВт · год/кг через необхідність підтримання глибокого вакууму та реалізації процесу сублимації [9; 16].

Вакуумне та мікрохвильово-вакуумне сушіння характеризуються витратами на рівні 3–5 кВт · год/кг, що пояснюється зниженням температури кипіння води, але супроводжується додатковими витратами на створення вакууму [9; 11; 16].

Конвективне сушіння є найбільш поширеним і характеризується питомими витратами 2–3 кВт · год/кг, однак тривалий тепловий вплив призводить до деградації каротиноїдів і погіршення якості продукту [3; 4; 9; 15].

Застосування ультразвуку дозволяє знизити енерговитрати до 1,8–2,5 кВт·год/кг завдяки інтенсифікації внутрішнього масопереносу та скороченню тривалості процесу [11; 13; 16]. Таким чином, ультразвукове сушіння поєднує енергоефективність і високу інтенсивність процесу.

Загальні витрати енергії конвективного способу сушіння із застосуванням впливу ультразвуку визначаються:

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_{us}, \quad (11)$$

де Q_{tot} – загальні витрати енергії, Дж; Q_{conv} – енергія, підведена газоподібним теплоносієм, Дж; Q_{us} – енергія, підведена ультразвуком, Дж;

Енергія ультразвуку:

$$Q_{us} = P_{us} \tau, \quad (12)$$

де P_{us} – потужність ультразвукового впливу, Вт; τ – час, с.

Питомі енерговитрати:

$$q = \frac{Q_{tot}}{m_w}, \quad (13)$$

де q – питомі енерговитрати, Дж/кг; Q_{tot} – загальні витрати енергії, Дж; m_w – маса видаленої вологи, кг.

Як випливає з рівнянь (11)–(13), скорочення часу сушіння τ внаслідок збільшення ефективного коефіцієнту дифузії D_{eff} (5) призводить до зменшення енерговитрат на конвективну складову та підвищення загальної енергоефективності процесу сушіння [11; 14; 16], зокрема каротиновмісної сировини.

4. Вплив ультразвуку на клітинну структуру каротиновмісної сировини

Ефективність ультразвукового сушіння значною мірою визначається його впливом на мікроструктуру рослинної тканини. Каротиновмісна сировина (морква, гарбуз, томати) (рисунк 1) характеризується клітинною будовою, в якій β -каротин локалізується переважно у хромопластах та клітинних мембранах. Цілісність клітинних структур істотно впливає на швидкість масопереносу та стабільність біологічно активних речовин [2; 9; 10; 14].

Під дією ультразвукових хвиль у рідкому середовищі виникають кавітаційні явища – утворення, ріст і колапс мікробульбашок. Це супроводжується локальними мікроударами, утворенням мікροструменів і періодичними механічними напруженнями, які впливають на клітинні стінки [11; 14].

На рис. 1 наведено узагальнену схему впливу ультразвуку на мікроструктуру каротиновмісної сировини.

У результаті цього відбуваються такі структурні зміни як часткове руйнування клітинних оболонок, утворення мікроканалів та пор у тканині, підвищення проникності мембран, зменшення капілярного опору руху вологи [11; 14].

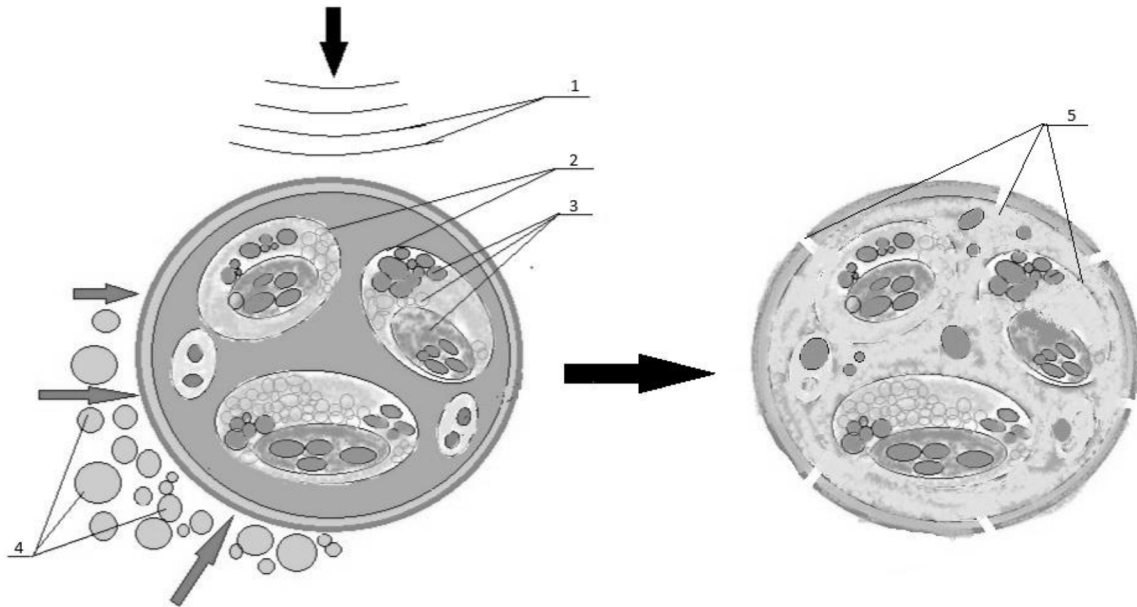


Рис. 1. Схема впливу ультразвукового сушіння на каротиновмісну сировину:

1 – ультразвукові хвилі; 2 – клітинні мембрани; 3 – хлоропласти та β -каротин; 4 – кавітаційні бульбашки; 5 – руйнування клітинних стінок, утворення мікроканалів та пор

Зазначені явища формують так званий «губчастий ефект», який сприяє інтенсифікації внутрішнього масопереносу. Саме цим пояснюється зростання ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} у рівнянні (5) та прискорення сушіння, що узгоджується з рівняннями (6)–(8).

Водночас важливо, що ультразвук забезпечує інтенсифікацію процесу без істотного підвищення температури, що має принципове значення для збереження каротиноїдів. Скорочення тривалості і величини теплового впливу зменшує термоокиснювальну деградацію β -каротину, що підтверджено експериментально [11; 13; 14].

Разом із тим надмірна інтенсивність ультразвуку може призводити до руйнування клітинної структури та окиснення каротиноїдів. Тому важливим є оптимальний вибір параметрів ультразвукових коливань (частоти, потужності, тривалості впливу) [11; 14; 16].

Висновки

У результаті узагальнення теоретичних положень і сучасних літературних даних щодо сушіння каротиновмісної сировини можна сформулювати такі висновки.

Традиційні способи сушіння характеризуються або високою енергоємністю, або значними втратами термолабільних компонентів, що обмежує їх ефективність для каротиновмісної сировини.

Запропонована фізична модель дає змогу, за прийнятих припущень, описати взаємозв'язок теплових і масообмінних процесів та врахувати вплив ультразвуку через зміну коефіцієнтів тепло- і масопереносу.

Узагальнення літературних даних дає підстави вважати, що одним із ключових чинників інтенсифікації конвективного сушіння за ультразвукового впливу є підвищення ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} , що супроводжується зростанням числа Фур'є та прискоренням видалення вологи.

Скорочення тривалості сушіння внаслідок інтенсифікації масопереносу може сприяти зменшенню теплового навантаження на термолабільну каротиновмісну сировину, що є важливою передумовою збереження β -каротину та інших біологічно активних речовин.

Узагальнення літературних джерел і запропонована схема енергетичного опису процесу свідчать, що за раціонального вибору режимів ультразвуковий вплив може забезпечувати



зниження питомих енерговитрат завдяки скороченню часу сушіння при помірних додаткових витратах енергії на генерацію ультразвуку.

Отже, комбіноване сушіння з ультразвуковою інтенсифікацією слід розглядати як перспективний напрям удосконалення процесу зневоднення каротиновмісної сировини, який потенційно поєднує підвищення енергоефективності, скорочення тривалості сушіння та поліпшення якості готового продукту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне встановлення кінетичних закономірностей сушіння за різних режимів ультразвукового впливу, уточнення коефіцієнтів математичної моделі та розроблення конструкцій сушарок для реалізації таких режимів.

Список використаних джерел

1. Vitamin A and Carotenoids – Health Professional Fact Sheet / National Institutes of Health, Office of Dietary Supplements. URL: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminA-HealthProfessional/>
2. Біохімія плодів та овочів : навч. посіб. / В. В. Євлаш, О. П. Прісс, М. Є. Сердюк [та ін.]. Мелітополь : Люкс, 2019. 206 с.
3. Малежик І. Ф., Бессараб О. С., Бандуренко Г. М., Левківська Т. М. Дослідження процесу сушіння морквяних вичавок при одержанні сухої каротиновмісної добавки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 152. С. 150–156. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/ecb297e0-1286-4e5f-b4f2-8bc509636e7f>
4. Косоголова Л. О., Левківська Т. М. Стабільність β-каротину при одержанні порошку з морквяних вичавок. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. Серія: Технічні науки. 2006. Вип. 1. С. 54. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/168177b1-7b20-40d3-863a-d5c43b0267ad>.
5. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку. *Біотехнологія*. 2010. Т. 3, № 5. С. 31–42. URL: <https://biotechnology.kiev.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnaliv/2010-ua/2010-no-5-ua/harcovi-poroski-z-roslinnoi-sirovini-klasifikacia-metodi-otrimanna-analiz-rinku-u-f-snezkin-z-o-petrova>
6. Марчевський В. М., Новохат О. А., Воронін Л. Г., Татарчук О. О. Сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2015. № 1 (14). С. 29–31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2015.52235>
7. Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O. Numerical modelling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 2/5 (86). P. 14–22. URL: <https://media.neliti.com/media/publications/307084-numerical-modeling-of-physical-fields-in-256dc303.pdf>
8. Kushniruk V., Novokhat O. Analysis of intensification of zeolite drying on a vibrating conveyor dryer with infrared emitters. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 2, No. 1 (70). P. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.279032>
9. Ignaczak A., Mierzwa D., Sitkiewicz I. Influence of pre-treatment and drying methods on the quality of dried carrot properties as snacks. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 10. Art. 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12102045>
10. Motegaonkar S., Shankar A., Tazeen H., Gunjal M., Payyanad S. A comprehensive review on carrot (*Daucus carota* L.): the effect of different drying methods on nutritional properties and its processing as value-added foods. *Sustainable Food Technology*. 2024. Vol. 2. P. 667–688. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3FB00162H>
11. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and ultrasound assisted rotary drying of carrot: analysis of process kinetics and energy intensity. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 22. Art. 10676. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210676>
12. Duan S., Ding C., Lu J., Bai W., Guan P., Liu J., Song Z., Chen H., Jia Y. Study the effect of ultrasonic pretreatment combined with electrohydrodynamics on drying characteristics and volatile components of carrots. *Applied Food Research*. 2024. Vol. 4. Art. 100634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100634>
13. Frias J., Peñas E., Ullate M., Vidal-Valverde C. Influence of drying by convective air dryer or power ultrasound on the vitamin C and β-carotene content of carrots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010. Vol. 58, no. 19. P. 10539–10544. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf102797y>



14. Zhou S., Chen W., Chitrakar B., Fan K. Ultrasound technology for enhancing drying efficiency and quality of fruits and vegetables: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2024. Vol. 17, no. 12. P. 4506–4536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03379-z>

15. Назаренко К. М., Снежкін Ю. Ф., Зубрій О. Г., Петрова Ж. О. Конвективне сушіння каротиновмісної сировини. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2009. № 659 : Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. С. 172–175. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/7780>

16. Mondal M. H. T., Ahmmed R., Khan M. J. Ultrasound pretreated freeze-drying of carrot: effect on nutritional value, bioactive compounds and microstructure. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, no. 1. Art. 100966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100966>

17. Galipothula R., Sharma P. D., Kotwaliwale N. Ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment enhances drying kinetics, quality attributes, bioactive compounds, microstructure, FTIR profiles, and sensory properties of Litchi. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article number 45205. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30051-z>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Novokhat, Yu. Zloba

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ULTRASOUND-ASSISTED INTENSIFICATION OF DRYING OF CAROTENE-CONTAINING RAW MATERIALS: AN ANALYTICAL REVIEW

Summary

The article summarizes current literature data on the use of ultrasound for intensifying the drying process of carotene-containing plant raw materials, including carrots, pumpkins, sweet potatoes, apricots, tomatoes, and other materials rich in β -carotene. The relevance of the topic is due to the need to combine two requirements: increasing dehydration intensity and reducing energy consumption, on the one hand, and ensuring maximum preservation of thermolabile carotenoids, color, and functional value of the product, on the other. It is shown that conventional convective drying, despite its simple implementation, is often accompanied by prolonged thermal exposure, contact with atmospheric oxygen, and an increased risk of pigment degradation. The advantages and limitations of modern drying methods are analyzed, and it is established that ultrasound should be considered not as an independent dehydration method, but as an effective tool for intensifying heat and mass transfer in combined technologies. The physical mechanisms of ultrasound action associated with cavitation phenomena, microstreaming, periodic compression and rarefaction of the medium, as well as the so-called “sponge effect”, which promotes the formation of additional pathways for moisture migration, reduces internal diffusion resistance, and accelerates drying, are considered. A physical model of the process is proposed, taking into account the interconnected heat and mass transfer phenomena, the influence of ultrasound on the heat transfer coefficient and effective diffusivity, as well as on the cellular structure of the material. The generalization of the results reported in the literature indicates that ultrasonic intensification can potentially reduce drying time, lower specific energy consumption, and improve β -carotene retention. It is concluded that combined ultrasound-assisted drying of carotene-containing raw materials is a promising direction and that further experimental studies are advisable to refine kinetic relationships, model parameters, and optimal process conditions.

Keywords: drying, convective drying, carotene-containing raw materials, β -carotene, ultrasound, mass transfer, effective diffusion coefficient, energy efficiency, drying kinetics.