УДК 664.8.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ СУШІННІ БІЛКОВО-КАРОТИНОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Петрова Ж.О.[1], член-кореспондент НАН України, д.т.н., **Граков Д.П.**[2], аспірант

[1]*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, http://orcid.org/0000-0001-7385-8495*

[2]*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: grakov.d@gmail.com*

https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.3

У статті досліджено кінетику сушіння білково-каротиновмісної сировини на основі моркви та сої за різних режимів зневоднення. Визначено, що доцільне використання ступеневих режимів, які дають можливість скоротити процес сушіння майже в 1,2 рази зі збереженням функціональних властивостей матеріалу. Виконано розрахунок теплообміну білково-каротиновмісної суміші. Розраховано зміну оптимізації сушіння під час зневоднення при різних режимах. Визначені зміни величини густини теплового потоку для різних режимів. Розраховано зміну коефіцієнту тепловіддачі.

The paper investigates the kinetics of drying protein-carotene-containing raw materials based on carrots and soybeans under different dehydration regimes. It has been determined that it is advisable to use stepwise modes, which make it possible to reduce the drying process by almost 1.2 times while maintaining the functional properties of the material. The heat transfer of the protein-carotene mixture was calculated. The change in drying optimisation during dehydration under different modes was calculated. Changes in the value of the heat flux density for different modes were determined. The change in the heat transfer coefficient was calculated.

Бібл. 31, рис. 7.

Ключові слова: конвективне сушіння, ефективні режими сушіння, каротиноїди, морква, білок, соя.

W^c – вологість по відношенню до сухої маси, %;
W – вологість по відношенню до загальної маси, %;
u – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.;
τ – час, хв;
V – швидкість теплоносія, м/с;
δ – товщина шару, мм;
N – швидкість сушіння, %/ хв;
Rb – критерій оптимізації сушіння;
c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг ºС);
r – питома теплота фазового перетворення (випаровування), кДж/кг;
b – температурний коефіцієнт сушіння;
$q\ (t)$ – тепловий потік, кДж / (кг •°С);
α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт / (м^2•°С)
$Кн$ – коефіцієнт набухання.

Вступ

Постановка проблеми. Сьогодні стоїть питання збереження функціональних елементів та зменшення енерговитрат при сушінні харчових продуктів. Сушіння є одним з класичних методів збереження та консервації овочів, фруктів, м'ясної сировини, які практикує людство [1, 2]. Використання сушіння, як консервації, завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах, що запобігає гниттю [2 -11]. Процес сушіння супроводжується тепло- і масообміном між сушильним агентом та вологою в матеріалі [12 - 14].

Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту [1, 15]. Тому створення теплотехнологій, що забезпечують зменшення енерговитрат та зберігають мікро- та макроелементи у сухому продукті є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Харчові продукти, які піддають сушінню, мають у своєму складі функціональні інгредієнти, а саме вітаміни та біологічні активні речовини [16]. Біологічно активні речовини, які відповідають потребам запобіганню хворобам і зміцненню здоров'я називають нутрицивиками [17]. Біологічно активні речовини, які природньо присутні в їжі, проявляють такі властивості, як антиоксидантні, протизапальні, імуномодулюючі та інші [18].

Поживні речовини, які забезпечують енергією, такі як ліпіди, вуглеводи та білки, відомі як макроелементи. Навпаки, вітаміни та інші органічні сполуки,

які необхідні в незначних кількостях і не беруть безпосереднього внеску в енергетичний обмін, називають мікроелементами або біоактивними сполуками [19].

Значний потенціал для прогресу з антиоксидантів у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості продемонстрували каротиноїди, завдяки своїй багатій поживній цінності та функціональними властивостями [20].

Каротиноїди – це барвисті тетратерпеноїдні пігменти С40, що виробляються різними рослинами, бактеріями та грибами [21-23]. Найважливіші каротиноїди в раціоні людини були виявлені в різних рослинах до середини 20 століття і включають β-каротин з моркви, лікопін з помідорів, лютеїн з листової зелені, криптоксантин з папайї та зеаксантин з кукурудзи [17].

Каротиноїди мають різноманітні біологічні дії, такі як властивості поглинання радикалів, протизапальну дію та активність провітаміну А, що робить їх привабливими для численних застосувань у медицині. Лютеїн, β -каротин і зеаксантин заслуговують на особливу увагу через їх виняткове накопичення у високих концентраціях у жовтій плямі сітківки. Це накопичення допомагає захистити від вікової дегенерації жовтої плями (ВМД), зменшуючи індукований світлом окислювальний стрес [24].

Морква (Daucus carota L.) - коренеплід, що має значну економічну та харчову цінності, широко культивується в усьому світі через багатий вміст вітамінів, мінералів, клітковини та антиоксидантів. Морква відіграє вирішальну роль у раціоні людини, забезпечуючи її необхідними поживними речовинами, такими як бета-каротин, що перетворюється на вітамін А, який має вирішальне значення для зору, імунної функції та здоров'я шкіри [25].

До складу коренеплодів моркви, крім каротину, входять інші жиророзчинні вітаміни (Д, Е, К), значна кількість водорозчинних вітамінів B_1, B_2, РР, С, а також біологічно активні речовини: стироли, лейцин, ферменти, що ще більш підвищує її харчову цінність [26-28].

Каротиноїди найкраще перетворюються у ретинол тоді, коли в раціоні харчування є достатня кількість легко засвоюваного білку та жиру. Тому доцільним було створення таких каротиновмісних порошків, які містили б в собі повний комплекс цих сполук. Цим вимогам відповідає така рослина, як соя. Завдяки високому вмісту жирів, соя є в ряді регіонів основною олійною культурою. Поліненасичені жирні кислоти, які входять до складу клітинних мембран та інших структурних елементів рослинних тканин, виконують в організмі ряд важливих функцій, в тому числі, забезпечують нормальний ріст та обмін речовин, еластичність судин. Соя також багата на білок, вміст якого становить до 44 %. До складу білка сої входять 8 незамінних амінокислот [26].

Метою роботи є дослідження сушіння білково-каротиновмісних сумішей, для зменшення тривалості процесу та збереження якості.

Матеріали та методи досліджень

На основі вище сказаного були створені суміші на основі моркви та сої у співвідношенні у 1:1. Сою попередньо повмивають водою протягом 5 хвилин, далі її замочували 60 хв у воді температурою 50 °С, а потім проварювали 20 хвилин при температурі 90-100°С. Моркву натерта на терці та перемішуємо з підготовленими бобами.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [30].

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси обчислюють за формулою, %:

$$W = \frac{q_{\text{вл}}}{q} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (1)$$

де m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^{\text{c}} = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100, \quad (2)$$

де m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Формули переходу, %:

$$W = \frac{W^{\text{c}}}{100 + W^{\text{c}}} \cdot 100,$$

$$W^{\text{c}} = \frac{W}{100 - W} \cdot 100,$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо *вологовміст* (питомий масовміст) матеріалу [31]:

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}, \quad (3)$$

Швидкість сушіння визначається, %/хв:

$$N = \frac{dW^c}{d\tau} = \frac{du}{d\tau} \cdot 100, \quad (4)$$

Досліджено залежність критерія оптимізації сушіння, яке дорівнює відношенню витрат кількості тепла на нагрівання тіла до кількості тепла на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу [31]:

$$Rb = \frac{c}{r} b, \quad (5)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг ºС);

r – питома теплота фазового перетворення (випаровування), кДж/кг; $b = \frac{d\bar{\theta}}{d\bar{u}}$ – температурний коефіцієнт сушіння, який представляє собою оцінку похідної середньої температури зразка від вологості.

За допомогою критерію оптимізації сушіння встановлений зв'язок між теплообміном і вологообміном під час сушіння [26]:

$$q^* = N^* (1 + Rb), \quad (6)$$

де q* – узагальнена густина теплового потоку; N*= N/N_{max} - максимальна узагальнена швидкість процесу сушіння.

Тепловий потік на одиницю поверхні зразка вираховується із співвідношення, кДж / (кг •°С):

$$q(\tau) = rg(du/d\tau)(1 + Rb), \quad (7)$$

де $g = G_{\text{а.с}}/S_{\text{вл}}$ – відношення маси абсолютно сухого тіла до поверхні матеріалу.

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою, Вт / (м²•°С):

$$\alpha = \frac{1000 \cdot q(\tau)}{t - t_C}, \quad (8)$$

де t – температура теплоносія; t_C – температура зразка.

Визначення коефіцієнту набухання. Досліджувані зразки білково-каротиновмісної сировини були підготовлені порошку із дисперсністю менше 0,5 мм. Коефіцієнт набухання визначали методом описаним у роботі [26]. Суть методу полягає в тому, що в підготовлених бюксах зважується досліджуваний матеріал масою 1 г, заливається водою у співвідношенні 1:10. Витримується певний проміжок часу – 30 хв, рідина зливається, а відновлений зразок зважується та розраховується коефіцієнт набухання $K_н$, який показує відносне збільшення маси продукту після набухання і визначає здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Коефіцієнт набухання розраховується за формулою:

$$K_{\text{н}} = \frac{G_2}{G_1}, \quad (9)$$

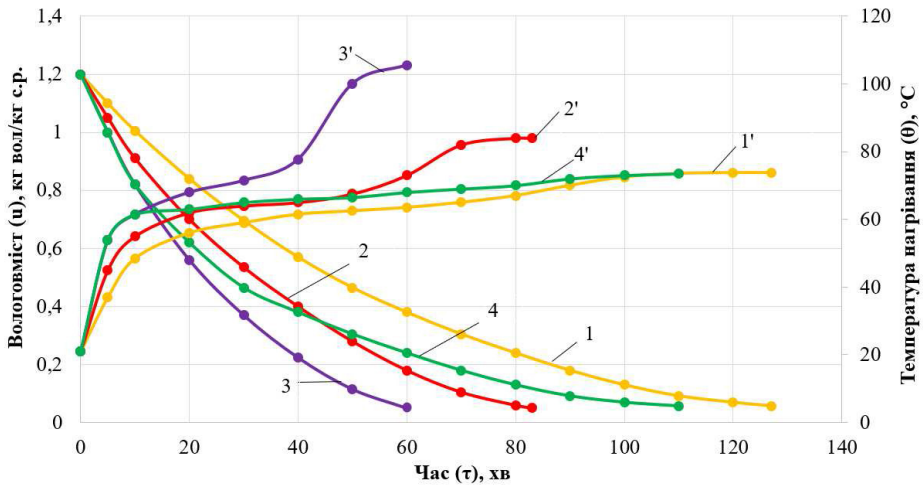

Рис. 1. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') білково-каротиновмістної суміші у співвідношенні 1:1, товщина шару δ ≈ 10 мм:
1, 1' – 80 ºС, 3 м/с; 2, 2' – 100 ºС, 3 м/с; 3, 3' – 120 ºС, 3 м/с; 4, 4' – 100/80 ºС, 3 м/с

Fig. 1. Changes in moisture content (1, 2, 3, 4) and temperature inside the layer (1', 2', 3', 4') of a protein-carotene mixture in a 1:1 ratio, layer thickness δ ≈ 10 mm:
1, 1' – 80 ºC, 3 m/s; 2, 2' – 100 ºC, 3 m/s; 3, 3' – 120 ºC, 3 m/s; 4, 4' – 100/80 ºC, 3 m/s

де $K_н$ – коефіцієнт набухання; G_1 та G_2 – маса матеріалу до та після набухання відповідно, г.

Результати дослідження

Дослідження кінетики сушіння білково-каротиновмісної сировини. Перед процесом сушіння була проведена створення білково-каротиновмістна суміш на основі моркви та сої у співвідношенні 1:1.

Дослідження сушіння проводили до вологості матеріалу 6±1%. Товщинна шару білково-каротиновмісної суміші дорівнювала 10 мм. Дослідження сушіння білково-каротиновмісної суміші виконували за режимами сушіння 80, 100, 120, 100/80 ºС та швидкістю теплоносія 3,0 м/с.

На рисунку 1 представлені зміна вологовмісту та температурні криві сушіння білково-каротиновмісної сировини. З рисунку 1 видно, що при збільшені температури теплоносія з 80 до 120 ºС тривалість сушіння зменшується у 2,1 рази. Однак при сушінні за режимом теплоносія 120 ºС спостерігається різке підвищення температури матеріалу, і після того як матеріал досяг температури 70 - 80 ºС, відбулось його різке потемніння та псування зовнішнього вигляду.

Для ступеневого режиму 100/80 ºС на початку процесу (рис. 1) температура теплоносія дорівнює 100 ºС. Через 15 – 20 хвилин сушіння температуру теплоносія знижують до 80 ˚С (крива 4 на рисунку 1).

Сушена суміш, одержана за режимами (криві 1, 4) мала світло-жовтий колір, зі смаком, властивим вихідним інгредієнтам. З проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальним режимом сушіння повинен бути режим, при якому температура матеріалу не перевищує 70 ºС - 80 ºС.

На рис. 2 представлена зміна швидкості сушіння білково-каротиновмісної суміші. Криві швидкості сушіння показують (рис. 2), що із збільшенням температури теплоносія інтенсивність зневоднювання зростає.

Розрахунок кінетики вологовобміну. Як бачимо, використання високотемпературного теплоносія з метою інтенсифікації процесу обмежується специфікою дослідного матеріалу. Узагальнення кривих кінетики сушіння у напівлогарифмічній системі координат за методикою В.В. Красникова дозволила визначити критичні вологовмісти сумішей. Величина першого критичного вологовмісту знаходиться у межі 0,45…0,60 кг вол/кг с.р., а другого 0,18…0,25 кг вол/кг с.р. вологості матеріалу та залежить від умов проведення експерименту [26].

Розрахунок кінетики теплообміну. За результатами кінетики вологообміну легко перейти до розрахунку кінетики теплообміну бінарних сумішей з метою визначення оптимальних режимів сушіння. Способом графічного диференціювання – кривих t-W розраховані значення температурного коефіцієнту сушіння та критерію оптимізації сушіння.

Побудовані залежності критерію оптимізації сушіння Rb = f(W). Характер їхнього змінювання за різними режимами сушіння виявився аналогічним (рис. 3).

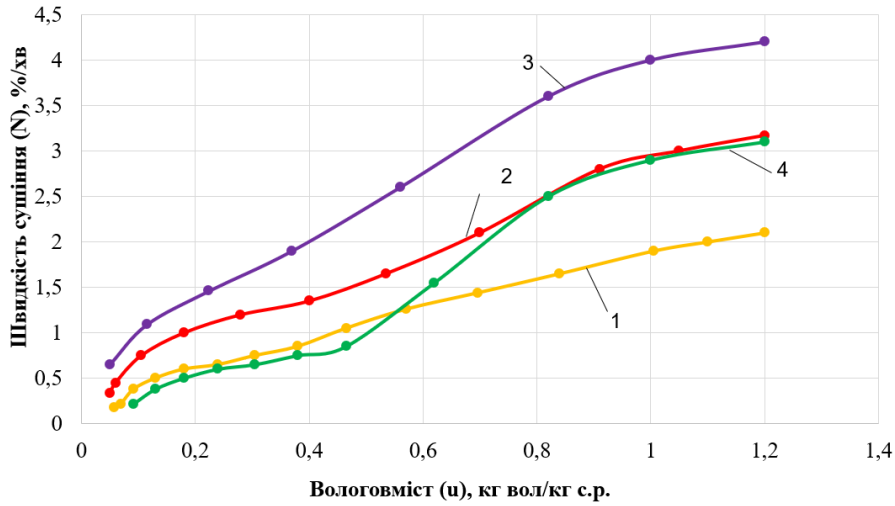

Рис. 2. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) білково-каротиновмістної суміші в шарі δ ≈ 10 мм: 1 – 80 ºС, 3 м/с; 100 ºС, 3 м/с, 3 м/с; 3 – 120 ºС, 3 м/с, 3 м/с; 4 – 100/80 ºС, 3 м/с

Fig. 2. Changes in the drying rate (1, 2, 3, 4) of a protein-carotene mixture in a layer δ ≈ 10 mm: 1 – 80 ºС, 3 m/s; 100 ºС, 3 m/s, 3 m/s; 3 – 120 ºС, 3 m/s, 3 m/s; 4 - 100/80 ºС, 3 m/s

Зі зниженням вологовмісту зменшується величина Rb, тобто тепло під час сушіння у більшій мірі витрачається на випаровування вологи з матеріалу, ніж на його нагрівання. При досягненні критичного вологовмісту 0,45…0,55 кг вол/кг с.р. критерій оптимізації сушіння Rb починає збільшуватися, що свідчить про те, що більша частина теплоти витрачається на нагрівання матеріалу, а не на випаровування з нього вологи. Ця обставина доводить на необхідність зниження температури теплоносія при досягненні матеріалом критичного вологовмісту 0,45…0,60 кг вол/кг с.р..). При досягненні критичного вологовмісту 0,4…0,45%, критерій оптимізації Rb різко збільшується, а значить більше теплоти витрачається на нагрів матеріалу. Сильне зменшення критерію оптимізації сушіння Rb при досягненні матеріалу вологовмісту 0,05…0,2 кг вол/кг с.р., говорить про, те що матеріал майже повністю прогрітий, а теплота витрачається на видалення найбільш міцно зв'язаної вологи. Отже, немає сенсу підтримувати високу температуру теплоносія на останній стадії процесу зневоднення. Обробка експериментальних даних довела, що критерій оптимізації сушіння не залежить від швидкості та вологовмісту теплоносія, а визначається тільки тепловим режимом сушіння.

Відносна узагальнена густина теплового потоку q* представлена на рисунку 4. Використовуючи залежність

$$qr = q^*/qo, \tag{10}$$

де qo – густина теплового потоку на початку процесу сушіння

Розраховані величини густини теплового потоку для різних температурних режимів (рис. 5).

Як бачимо, в міру видалення вологи з матеріалу густина необхідного теплового потоку зменшується. Причому, найбільше зниження відповідає найбільш інтенсивному режиму сушіння. Тобто ще раз підтверджується необхідність зниження температури теплоносія на кінцевій стадії процесу сушіння, що безумовно позитивно впливає і на якість сушеного матеріалу.

На рисунку 6 представлена зміна коефіцієнту тепловіддачі при сушінні білково-каротиномісної сировини. Як видно з рис. 6 на початку нагрівання білково-каротиновмісної суміші коефіцієнт тепловіддачі зростає. При досягненні вологовмісту 0,9 кг вол/кг с.р. за температурними режимами 100 (крива 2 рис.6) та 120 (крива 3 рис.6) ºС коефіцієнт тепловіддачі починає падати. Це

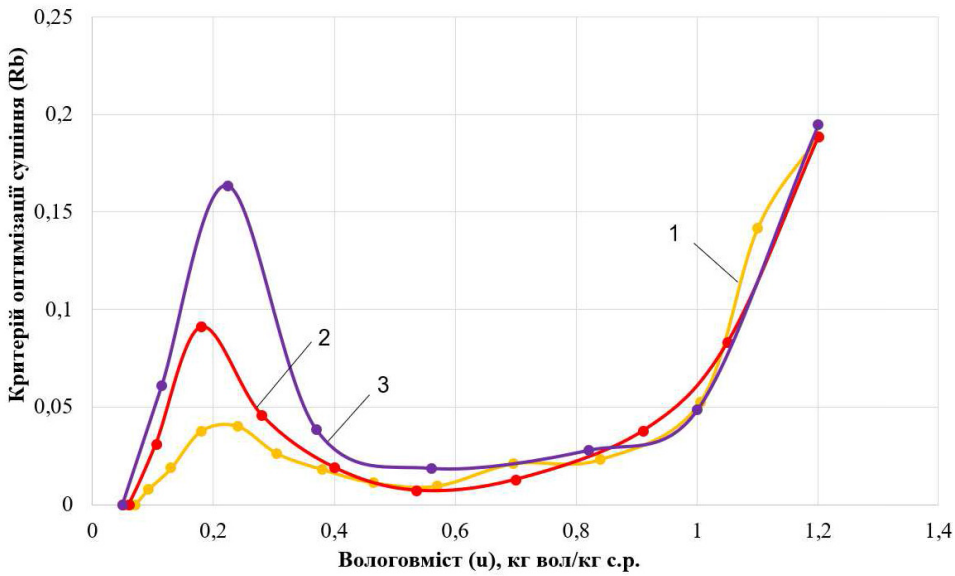

Рис. 3. Зміна критерію оптимізації сушіння в процесі зневоднення білково-каротиновмісної суміші: V=3 м/с; d=10 г/кг сухого повітря; товщина шару δ ≈ 10 мм; співвідношення 1:1; температура теплоносія: 1 – t=80 ºС, 2 – t=100 ºС, 3 – t=120 ºС

Fig. 3. Changing the drying optimisation criterion in the process of dehydration of a protein-carotene mixture: V = 3 m/s; d = 10 g/kg dry air; layer thickness δ ≈ 10 mm; 1:1 ratio; coolant temperature: 1 – t=80 °C, 2 – t=100 °C, 3 – t=120 °C

відбувається через збільшення часу нагрівання випаровування води з білково-каротиновмісної суміші зменшувалося, тобто об'ємна витрата гарячого повітряного потоку зменшувалася, а отже, зменшувався коефіцієнт тепловіддачі. За режимом 80 ºС (крива 3 рис.1) при досягненні вологовмісту 1 кг вол/кг с.р. зростання коефіцієнта тепловіддачі почало сповільнюватися, а після 0,84 кг вол/кг с.р. зміна коефіцієнта тепловіддачі поступово вирівнялася, після чого при 0,6 кг вол/кг с.р. починається падіння. Оскільки на вихідну температуру гарячого повітря впливає зміна вмісту вологи в білково-каротиновмісної суміші, матеріал переходить в стадію повільного сушіння після стадії швидкісного сушіння, волога в матеріалі випаровується за рахунок тепла, і підвищення температури в матеріалі стає повільним.

За температурним режимом 80 ºС та досягнені вологовмісту 0,38 кг вол/кг с.р. падіння коефіцієнту тепло віддачі почало сповільнюватися до 0,25 кг вол/кг с.р., після чого починає знову швидко зростати до 0,13 кг вол/кг с.р., після чого падати. Такий самий характер має режим 100 ºС.

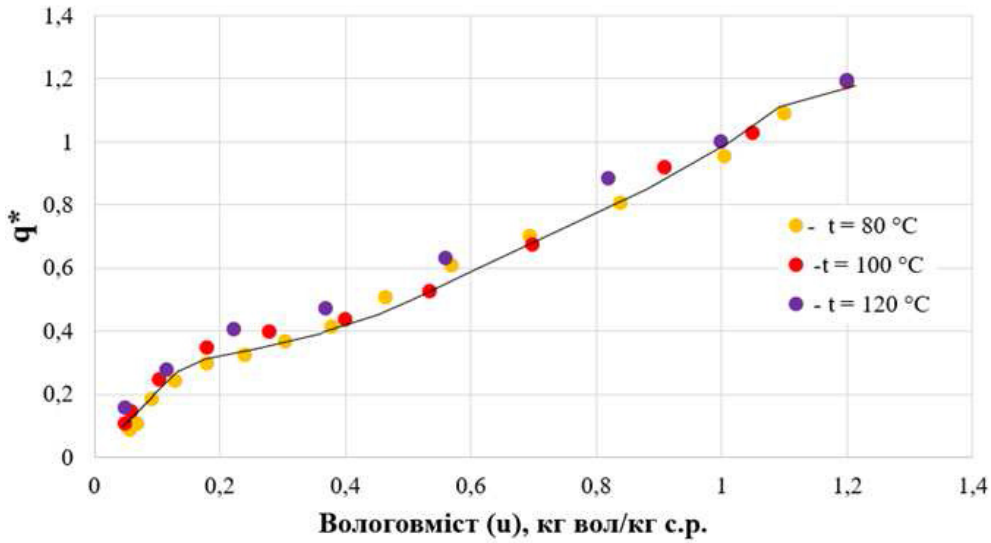

Рис. 4. Узагальнена густина теплового потоку

Fig. 4. Generalised heat flux density

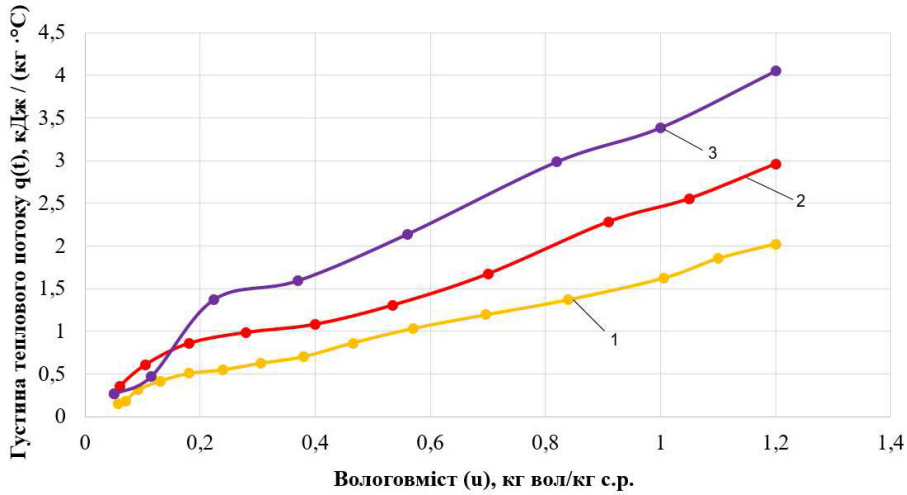

Рис. 5. Зміна густини теплового потоку при сушінні білково-каротиновмісної суміші: V=3 м/с; d=10 г/кг сухого повітря; товщина шару δ ≈ 10 мм; співвідношення 1:1; температура теплоносія: 1 – t=80 ºС, 2 – t=100 ºС, 3 – t=120 ºС

Fig. 5. Changes in heat flux density during drying of a protein-carotene mixture: V = 3 m/s; d = 10 g/kg dry air; layer thickness δ ≈ 10 mm; 1:1 ratio; coolant temperature: 1 – t=80 °C, 2 - t=100 °C, 3 – t=120 °C

Виходячи отриманим результатам, переставленими на рисунку 6, сушіння при високих температурах не доцільне, через низький коефіцієнт тепловіддачі між матеріалом та теплоносієм порівняно з режимом 80 ºС. Також доцільне використання ступеневих режимів, які дозволять зберігати коефіцієнт тепловіддачі.

Коефіцієнт набухання, важливий при визначенні властивостей матеріалів. Тому були виконанні дослідження по визначенню коефіцієнту набухання при температурі води 20, 45, 60 та 80 ºС для ступневого режими сушіння. Результати досліджень представлені на рис. 7. Як видно з рисунку при температурі 45 та 80 ºС коефіцієнт набухання становить 4,12.

Висновки

Досліджено кінетику сушіння білково-каротиновмісної суміші, які показали, що використання ступеневих режимів 100/80 та 80 ºС, які дозволяють зберегти біологічно активні речовини та колір в матеріалі.

Виконано розрахунок кінетики теплообміну, який дозволив побудувати залежності критерію оптимізації сушіння, густини теплового потоку та коефіцієнту теплоовіддачі від вологовмісту матеріалу.

Досліджено залежність коефіцієнту оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, який дозволив визначити оптимальні режими для сушіння білково-каротиновмісної суміші.

Отримана залежність коефіцієнту теплоовіддачі при сушінні від вологовмісту, показує не доцільність сушіння при високих температурах порівняно з 80 ºС.

Результати розрахунку теплообміну показали, що найкраще використовувати ступеневі режими 100/80 та режим 80 ºС.

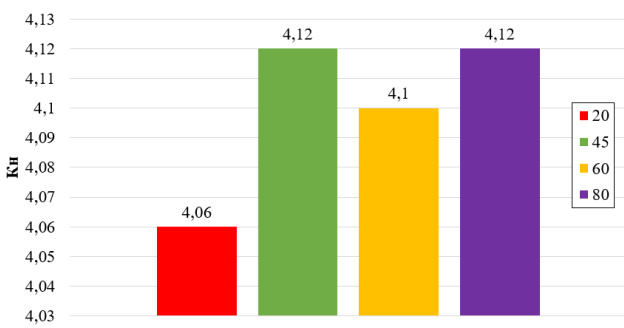

Рис. 7. Зміна коефіцієнта набухання білково-каротиновмісної суміші

Fig. 7. Changes in the swelling coefficient of a protein-carotene mixture

ЛІТЕРАТУРА

1. *Doymaz L.* Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.

2. *Inyang U., Oboh I., Etuk B.* Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

3. *Sun T, Rao S, Zhou X, Li L.* Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. Mol Hortic, 2022, 2(1), 3. https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2

4. *Sun Y., Hu P., Jiang Y.* et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across Gloriosa varieties. BMC Plant Biol, 2025, 25, 66. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y

5. *Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA.* Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. Food Science and Engineering, 2025, 6(1), 87-102.

6. *Al-Anoos I, EI-dengawy R, Hasanin H.* Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (Cucurbita maxima) seed varieties. Journal of Plant Science & Research, 2015, 2(2), 1-4.

7. *Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A.* Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. International Journal of Emerging Trends in Science and Technology, 2014, 1(07), 1091-1097.

8. *Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M.* The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. LWT-Food Science and Technology, 2023, 175, 114469.

9. *Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T.* Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. Tropical Agroecosystems (TAEC), 2024, 5(2), 78-81. http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81

10. *Hyun J.-E.* et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (Diospyros kaki Thunb.) Stored at Various Temperatures. Journal of Food Quality, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. https://doi.org/10.1155/2019/6256409.

11. *Снєжкін Ю.Ф., Шапар Р.О.* Енергоефективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. Теплофізика та Теплоенергетика, 2020, 42(2), 5-17. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.1

12. *Adeboye O.C., Oputa C.O.* Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. Journal of Agriculture, 1996, 18 (1/2), 1-9.

13. *Bamire A.S., Oke J.T.* Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. Journal of Vegetable Crop Production, 2003, 9, 11-18.

14. *Снєжкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В.* Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. Теплофізика та Теплоенергетика, 2024, 46(4), 5-14. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1

15. *Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C.* Food dehydration. Ln D.R Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.

16. Essa M.M., Bishir M., Bhat A. et al. Functional foods and their impact on health. J Food Sci Technol, 2023, 60, 820–834. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3.

17. *Shanaida, M., Mykhailenko, O., Lysiuk, R., Hudz, N., Balwierz, R., Shulhai, A., Shapovalova, N., Shanaida, V., & Bjørklund, G.* (2025). Carotenoids for Antiaging: Nutraceutical, Pharmaceutical, and Cosmeceutical Applications. Pharmaceuticals, 18(3), 403. https://doi.org/10.3390/ph18030403

18. *Rivero-Segura, N.A.; Zepeda-Arzate, E.A.; Castillo-Vazquez, S.K.; Fleischmann-delaParra, P.; Hernandez-Pineda, J.; Flores-Soto, E.; Garcia-delaTorre, P.; Estrella-Parra, E.A.; Gomez-Verjan, J.C.* Exploring the Geroprotective Potential of Nutraceuticals. Nutrients 2024, 16, 2835. https://doi.org/10.3390/nu16172835

19. *Luy, M.; Di Giulio, P.; Di Lego, V.; Lazarevic, P.; Sauerberg, M.* Life Expectancy: Frequently Used, but Hardly Understood. Gerontology 2020, 66, 95–104.

20. *Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P.* Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, Nutrients, 2019, 11, 1093.

21. *Melendez-Martinez, A.J.; Mandic, A.I.; Bantis, F.; Bohm, V.; Borge, G.I.A.; Brncic, M.; Bysted, A.; Cano, M.P.; Dias, M.G.; Elgersma, A*.; et al. A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: Status quo, applications, patents, and research needs. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022, 62, 1999–2049. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867959

22. *Mapelli-Brahm, P.; Gomez-Villegas, P.; Gonda, M.L.; Leon-Vaz, A.; Leon, R.; Mildenberger, J.; Rebours, C.; Saravia, V.; Vero, S.; Vila, E.;* et al. Microalgae, Seaweeds and Aquatic Bacteria, Archaea, and Yeasts: Sources of Carotenoids with Potential Antioxidant and Anti-Inflammatory Health-Promoting Actions in the Sustainability Era. Mar. Drugs 2023, 21, 340. https://doi.org/10.3390/md21060340

23. *Sandmann, G*. Carotenoids and Their Biosynthesis in Fungi. Molecules 2022, 27, 1431. https://doi.org/10.3390/molecules27041431

24. *Di Carlo, E.; Augustin, A.J.* Prevention of the Onset of Age-Related Macular Degeneration. J. Clin. Med. 2021, 10, 3297. https://doi.org/10.3390/jcm10153297

25. *Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T.* Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. Tropical Agroecosystems (TAEC), 2024, 5(2), 78-81. http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81

26. *Снєжкін Ю.Ф., Петрова Ж.О.* Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмістних порошків. Київ: ВД «Академперіодика», 2007. 162с.

27. *Ciurzyńska, A., Janowicz, M., Karwacka, M., Galus, S., Kowalska, J., & Gańko, K*. (2022). The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. Applied Sciences, 12 (20), 10588.

28. *Imani, J.; Lorenz, H.; Kogel, K.-H.; Glebe, D.* Transgenic carrots: Potential source of edible vaccin. J. Verbr. Lebensm. 2007, 2, 105.

29. *Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A*. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand // Journal of Ecological Engineering. 2021. 22(6). P. 159-166. https://doi.org/10.12911/22998993/137676

30. *Ткаченко С. Й., Співак О. Ю*. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.

31. *Снєжкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Слободянюк, К.С.* Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків. Київ.: Тропеа, 2022, 148с.

STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES DURING DRYING OF PROTEIN-CAROTENE-CONTAINING MATERIALS

Petrova Zh.O.[1], Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Grakov D.P.**[2], PhD student

[1]*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor, bergelzhanna@ukr.net, http://orcid.org/0000-0001-7385-8495*

[2]*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, , grakov.d@gmail.com*

https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.3

Today, the issue of preserving functional elements and reducing energy consumption during food drying is a major concern. At the same time, drying is a complex energy-intensive process. Therefore, there is an urgent need to develop and implement modern energy-efficient thermal technologies that reduce energy consumption for drying processes and preserve micro and macro elements in the dry product.

Carotenoids, which are classified as antioxidants, are the most common biologically active substances. They represent a significant potential in the food, cosmetics and pharmaceutical industries. Carotenoids are a class of terpenoid pigments that are mainly responsible for the bright yellow, orange and red colours of plant fruits and flowers.

One of the most common carotenoids in Ukraine is carrot. It is widely cultivated around the world due to its rich content of vitamins, minerals, fibre and antioxidant properties. Carrots are seasonal products and have a shelf life that can be extended by preservation, namely drying.

Carotenoids are best converted to retinol when the diet contains sufficient amounts of easily digestible protein and fat. Therefore, it was advisable to create carotene-containing powders that would contain a full range of these compounds.

The aim of the study is to investigate the drying of protein-carotene mixtures to reduce the duration and maintain quality.

In this work, we have studied the drying of protein-carotene-containing raw materials based on carrots and soybeans on an experimental convection stand.

From the studies conducted, it can be concluded that the optimal drying mode should be the mode at which the temperature of the material does not exceed 70 °C - 80 °C. Therefore, it is advisable to use a 100/80°C step mode or 80°C mode.

The dependencies of the drying optimisation criterion Rb = f(W) were constructed. The processing of experimental data has shown that the drying optimisation criterion does not depend on the speed and moisture content of the coolant, but is determined only by the thermal regime of drying. The dependence of the drying optimisation coefficient on the moisture content of the material was investigated, which made it possible to determine the optimal modes for drying a protein-carotene mixture.

The values of the heat flux density for different temperature conditions were calculated.

The obtained dependence of the heat transfer coefficient during drying on the moisture content shows that drying at high temperatures compared to 80 °C is not advisable.

The results of the heat transfer calculation showed that it is best to use step modes of 100/80 and 80 °C.

Key words: convective drying, efficient drying modes, carotenoids, carrots, protein, soybeans.

References 31, figure 7.

1. *Doymaz I.* Drying behavior of green beans, Journal of Food Engineering, 2005, 69, 161-165.

2. *Inyang U., Oboh I., Etuk B.* Drying and the different techniques. International Journal of Food Nutrition and Safety, 2017, 8(1), 45-72.

3. *Sun T, Rao S, Zhou X, Li L.* Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. Mol Hortic, 2022, 2(1), 3. https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2

4. *Sun Y., Hu P., Jiang Y.* et al. Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across Gloriosa varieties. BMC Plant Biol, 2025, 25, 66. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y

5. *Arshad Z, Ashraf N, Ali A, Iqbal A, Rafique M, Gulzar M, Ahmad A, Hassan SA.* Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. Food Science and Engineering, 2025, 6(1), 87-102.

6. *Al-Anoos I, EI-dengawy R, Hasanin H*. Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (Cucurbita maxima) seed varieties. Journal of Plant Science & Research, 2015, 2(2), 1-4.

7. *Islam M, Jothi JS, Habib MR, Iqbal A*. Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. International Journal of Emerging Trends in Science and Technology, 2014, 1(07), 1091-1097.

8. *Piepiórka-Stepuk J, Wojtasik-Kalinowska I, Sterczyńska M, Mierzejewska S, Stachnik M, Jakubowski M.* The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. LWT-Food Science and Technology, 2023, 175, 114469.

9. *Mia S., Bulbul M.T.A., Hasan T., Sheikh M.H., Haque M.T.* Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. Tropical Agroecosystems (TAEC), 2024, 5(2), 78-81. http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81

10. *Hyun J.-E.* et al Changes in Microbiological and Physicochemical Quality of Dried Persimmons (Diospyros kaki Thunb.) Stored at Various Temperatures. Journal of Food Quality, 2019, Volume 2019, Issue 1. P. 1–9. https://doi.org/10.1155/2019/6256409.

11. *Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.* Enerhoefektyvne obladnannia dlia znevodnennia termolabilnykh materialiv [Energy-efficient equipment for dehydration of thermolabile materials.]. Teplofizyka ta Teploenerhetyka, 2020, 42(2), 5-17. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.1 (in Ukr.).

12. *Adeboye O.C., Oputa C.O.* Effect of galex on growth and fruit nutrient composition of okra. Journal of Agriculture, 1996, 18 (1/2), 1-9.

13. *Bamire A.S., Oke J.T.* Profitability of vegetable farming under rainy and dry season production in South-Western Nigeria. Journal of Vegetable Crop Production, 2003, 9, 11-18.

14. *Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V.* Intensyvni sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnym ta kombinovanym enerhopidvedenniam [Intensive methods of drying apple slices with convective and combined energy supply]. Teplofizyka ta Teploenerhetyka, 2024, 46(4), 5-14. https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1 (in Ukr.).

15. *Okos M.R., Campanella O., Narsimhan G., Singh R.K., Witnauer A.C.* Food dehydration. Ln D.R Heldman and D.B. Lund (Eds) Handbook of food engineering. New York: Marcel Dekker, 1992, 601 -744.

16. *Essa M.M., Bishir M., Bhat A.* et al. Functional foods and their impact on health. J Food Sci Technol, 2023, 60, 820–834. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3.

17. *Shanaida, M., Mykhailenko, O., Lysiuk, R., Hudz, N., Balwierz, R., Shulhai, A., Shapovalova, N., Shanaida, V., & Bjørklund, G.* (2025). Carotenoids for Antiaging: Nutraceutical, Pharmaceutical, and Cosmeceutical Applications. Pharmaceuticals, 18(3), 403. https://doi.org/10.3390/ph18030403

18. *Rivero-Segura, N.A.; Zepeda-Arzate, E.A.; Castillo-Vazquez, S.K.; Fleischmann-delaParra, P.; Hernandez-Pineda, J.; Flores-Soto, E.; Garcia-delaTorre, P.; Estrella-Parra, E.A.; Gomez-Verjan, J.C.* Exploring the Geroprotective Potential of Nutraceuticals. Nutrients 2024, 16, 2835. https://doi.org/10.3390/nu16172835

19. *Luy, M.; Di Giulio, P.; Di Lego, V.; Lazarevic, P.; Sauerberg, M*. Life Expectancy: Frequently Used, but Hardly Understood. Gerontology 2020, 66, 95–104.

20. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene, Nutrients, 2019, 11, 1093.

21. *Melendez-Martinez, A.J.; Mandic, A.I.; Bantis, F.; Bohm, V.; Borge, G.I.A.; Brncic, M.; Bysted, A.; Cano, M.P.; Dias, M.G.; Elgersma, A.;* et al. A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: Status quo, applications, patents, and research needs. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022, 62, 1999–2049. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867959

22. *Mapelli-Brahm, P.; Gomez-Villegas, P.; Gonda, M.L.; Leon-Vaz, A.; Leon, R.; Mildenberger, J.; Rebours, C.; Saravia, V.; Vero, S.; Vila, E.;* et al. Microalgae, Seaweeds and Aquatic Bacteria, Archaea, and Yeasts: Sources of Carotenoids with Potential Antioxidant and Anti-Inflammatory Health-Promoting Actions in the Sustainability Era. Mar. Drugs 2023, 21, 340. https://doi.org/10.3390/md21060340

23. *Sandmann, G.* Carotenoids and Their Biosynthesis in Fungi. Molecules 2022, 27, 1431. https://doi.org/10.3390/molecules27041431

24. *Di Carlo, E.; Augustin, A.J*. Prevention of the Onset of Age-Related Macular Degeneration. J. Clin. Med. 2021, 10, 3297. https://doi.org/10.3390/jcm10153297

25. *Mia S., Bulbul M. T. A., Hasan T., Sheikh M. H., Haque M. T.* Maximizing carrot productivity: the role of potassium and boron in crop performance. Tropical Agroecosystems (TAEC), 2024, 5(2), 78-81. http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81

26. *Sniezhkin Y., Petrova Z*. Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia karotynovmistnykh poroshkiv. [Heat and mass transfer processes in the production of carotene-containing powders] Kyiv: VD «Akademperiodyka», 2007. 162s. (in Ukr.).

27. *Ciurzyńska, A., Janowicz, M., Karwacka, M., Galus, S., Kowalska, J., & Gańko, K*. (2022). The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. Applied Sciences, 12 (20), 10588.

28. Imani, J.; Lorenz, H.; Kogel, K.-H.; Glebe, D. Transgenic carrots: Potential source of edible vaccin. J. Verbr. Lebensm. 2007, 2, 105.

29. *Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A.* Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand // Journal of Ecological Engineering. 2021. 22(6). P. 159-166. https://doi.org/10.12911/22998993/137676

30. *Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu*. Sushylni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk [Drying processes and installations. Study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2007. 76 s. (in Ukr.).

31. *Sniezhkin, Yu.F., Petrova, Zh.O., Samoilenko, K.M., Slobodianiuk, K.S.* Teplomasoobminni protsesy otrymannia kombinovanykh funktsionalnykh poroshkiv [Heat and mass transfer processes for the production of combined functional powders]. Kyiv.: Tropea, 2022, 148s. (in Ukr.).

Отримано 22.04.2025
Received 22.04.2025

Прийнято до друку 10.05.2025
Accepted for publication 10.05.2025