

УДК 664.8.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ФОРМИ МАТЕРІАЛУ
ПРИ СУШІННІ ХУРМИ (DIOSPYROS KAKI L.)Петрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Новікова Ю.П.², доктор філософії¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, e-mail: yuliianovikova3@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495><https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.3>

У статті досліджено кінетику сушіння хурми (Diospyros kaki L.) за різних режимів зневоднення та форми матеріалу. Визначено, що комбіновані та ступеневі режими дають можливість скоротити процес сушіння майже в 1,41 – 1,92 рази, в залежності від форми матеріалу, зі збереженням кольору і смаку матеріалу. При порівнянні форми матеріалу при сушінні найменша тривалість сушіння у скибочок порівняно з іншими.

The paper investigates the kinetics of drying persimmon (Diospyros kaki L.) under different dehydration regimes and material shape. It has been determined that combined and stepwise modes make it possible to reduce the drying process by almost 1.41-1.92 times, depending on the shape of the material, while maintaining the colour and taste of the material. When comparing the shape of the material during drying, slices have the shortest drying time compared to others.

Бібл. 40, рис. 8.

Ключові слова: конвективне сушіння, інфрачервоне випромінювання, ефективні режими сушіння, каротиноїди, хурма. 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.**Вступ**

Постановка проблеми. Продовольча безпека стала нагальною проблемою для агрохарчової промисловості в останні десятиліття. Щороку викидається приблизно 1,5 мільярда тонн харчових продуктів, що загострює проблеми, пов'язані з дефіцитом продовольства, неефективністю енергоспоживання та зміною клімату [1]. Для зменшення цих значних втрат, для консервування харчових продуктів використовуються різні методи сушіння, такі як сублімаційне сушіння, мікрохвильове сушіння, конвекційне сушіння гарячим повітрям, періодичне мікрохвильово-конвекційне сушіння та гібридне сушіння [1]. Сушіння є важливим процесом у виробництві різних харчових продуктів, таких як хлібобулочні інгредієнти, чай, трави, кава, сухі молочні продукти, локшина швидкого приготування та борошно [2, 3]. Процес сушіння включає тепло- та масообмін [4 - 6].

Зневоднення сільськогосподарської продукції є важливим для деактивації мікроорганізмів, що спричиняють гниття, для ефективного зберігання [7, 8]. Хоча сушіння має різні переваги, воно споживає приблизно

15% енергії від загального обсягу промислового споживання енергії [9]. Також під час процесу сушіння продукти зазнають різних фізичних змін, таких як зміна форми зразка через усадку. Це дозволяє мінімізувати витрати на пакування, зберігання та транспортування, а також забезпечує можливість зберігання продукту за температури навколишнього середовища [10]. Фізичні зміни сильно залежать від умов експлуатації, таких як відносна вологість повітря, температура, час сушіння та товщина зразка [11 - 13]. Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту [14, 15]. Отже, існує серйозна проблема у створенні та впровадженні у великих масштабах сучасних енергоефективних технологій нагрівання, які можуть зменшити споживання енергії в процесі сушіння та зберегти мікро- та макроелементи висушеного продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Продукти, які є повноцінними, багатими або з підвищеним вмістом мікро- і макроелементами, називаються

функціональними продуктами харчування, і можуть сприяти здоров'ю поза їхньою основною функцією забезпечення необхідними поживними речовинами [16, 17].

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Ж.О. розроблено класифікацією основних рослинних функціональних інгредієнтів, які залишилися у сухих продуктах: антиоксидантні, фітоестрогенні, фолатовмісні та пребіотичні [18].

Каротиноїди продемонстрували великий потенціал, як антиоксидант, у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості завдяки своїй багатій харчовій цінності та функціональним властивостям [19, 20]. Більшість каротиноїдів міститься в жовто-помаранчевих та червоних фруктах, овочах та ягодах. Також вони містяться в низці зелених овочах та травах [19].

Хурма (*Diospyros kaki* L.) – це субтропічний фрукт, який є джерелом бета-каротину, вітамінів А і Е, аскорбінової кислоти, багата вуглеводами, дубильними речовинами і фенольними сполуками, є хорошим джерелом клітковини, а також має потужну антиоксидантну дію [21 – 25]. Традиційними виробниками хурми є Китай, Корея та Японія, а також вона була натуралізована в багатьох країнах Східної Азії та Південної Європи [26–28]. Плоди хурми можна переробляти на такі продукти, як сухофрукти [29], джеми, хурмовий оцет, фруктові соки [30, 31]. Сушіння хурми проводять за різними методами, такими як сушіння на сонці або на відкритому повітрі [32 – 34], конвективне [35], мікрохвильове, вакуумне [36], сублімаційне [37], інфрачервоне [38] та різні комбіновані методи [39].

Конвективне сушіння є одним із найкращих методів сушіння каротинвмісних матеріалів, таких як хурма, але зазвичай воно має велику тривалість, яку слід скоротити для кращого збереження функціональних властивостей. Тому **метою роботи** є дослідження комбінованих методів сушіння та форми матеріалу, для зменшення тривалості.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використовували плоди хурми, які спочатку мили, або нарізали на кубики розміром близько 5х5 (рис. 1 а) мм або натирали за допомогою тертки на стружку (рис. 1 б) або нарізали за допомогою шатківниці для овочів на скибочки (рис. 1 в) товщиною 2 мм.

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [20].

В теорії сушіння *вологість* матеріалу зазвичай розраховується відносно маси абсолютно су-

хого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною, а також є зручною для розрахунків [40]. Перехід від вологості W^c , розрахований по відношенні до маси сухої речовини матеріалу, до вологості W , розраховано до зальної маси, простий.

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q = q_{\text{вл}} - q_{\text{ср}},$$

де $q_{\text{вл}}$ – маса води, кг; $q_{\text{ср}}$ – маса сухої речовини, кг.

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

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

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, %:

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

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, %:

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

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

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо *вологовміст* (питомий масовміст) матеріалу [40]:

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

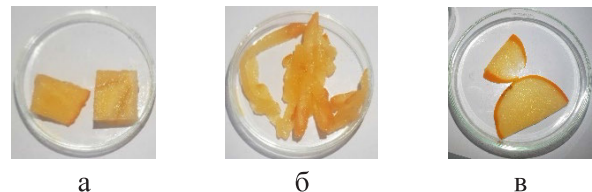


Рис. 1. Зовнішній вигляд хурми кубику(а), стружки (б) та скибочки (в)

Fig. 1. Appearance of persimmon cubes (a), chips (b) and slices (c)

Результати дослідження

Дослідження хурми проводили за режимами сушіння 65, 100, 100/65 °C та комбінованим 3800Вт/м² +65 °C, швидкість теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу 9±2%.

Для режимів сушіння 100/65 °C та 3800Вт/м² +65 °C на початку процесу температуру матеріалу підіймали до 58 °C, після чого процес сушіння відбувався за температури теплоносія 65 °C.

На рис. 2 показано зміни вологовмісту (рис. 2 а), вологості (рис. 2 б) та температури в центрі шару плодів хурми, нарізаних кубиками 5х5 мм. Як видно на ри-

сунку 2, найдовший час сушіння становить 269 хвилин при 65°C. Найкоротший час сушіння – 94 хвилини при 100°C [20]. Як бачимо з рис. 2, комбінований режим 3800 Вт/м² +65°C та ступеневий режим 100/65°C мають коротший час сушіння, ніж режим 65°C – 140 та 165 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м² +65 °C працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м² та теплоносієм 65 °C, після досягнення температури матеріалу 58 °C вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 51,5 °C, далі вона підіймається до 63,5 °C [20].

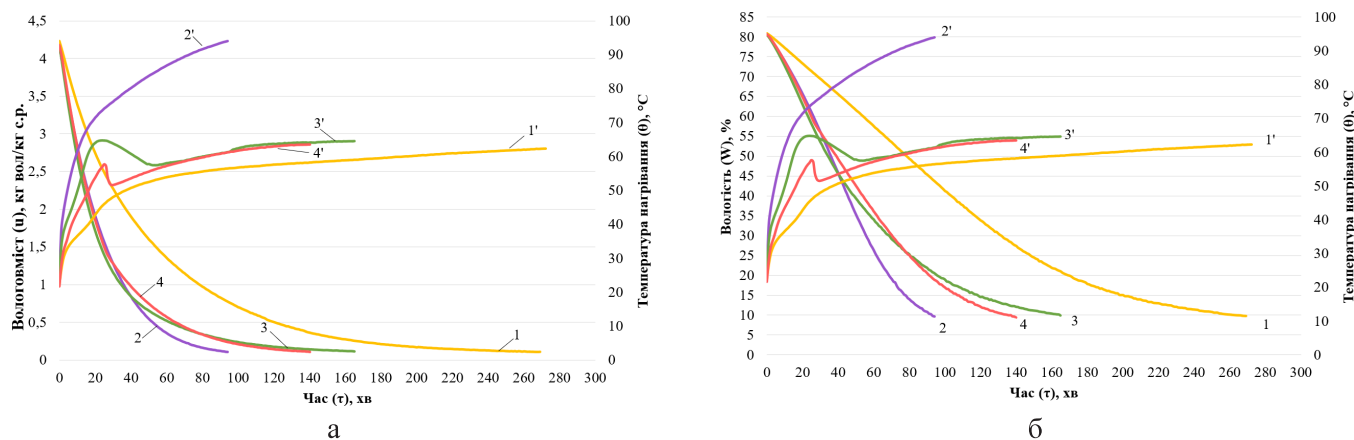


Рис. 2. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм від часу в шарі:

1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с [20]

Fig. 2. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmons cut into 5x5 mm cubes with time in the bed: 1 – 65 °C, 3 m/s; 2 – 100 °C, 3 m/s; 3 – 100/65 °C, 3 m/s; 4 – 3800W/m² +65 °C, 3 m/s [20]

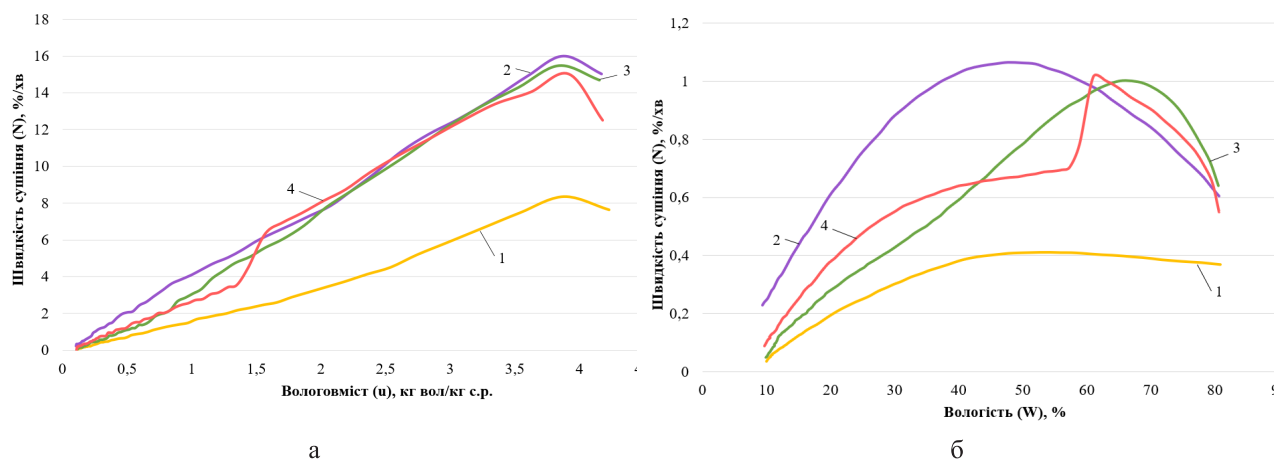


Рис. 3. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) хурми нарізаної кубиками розміром 5х5 мм в шарі: 1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с [20]

Fig. 3. Changes in drying speed (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmons cut into 5x5 mm cubes in a layer: 1 – 65 °C, 3 m/s; 2 – 100 °C, 3 m/s; 3 – 100/65 °C, 3 m/s; 4 – 3800W/m² +65 °C, 3 m/s [20]

За ступеневим режимом 100/65 °С матеріал сушили при температурі теплоносія 100 °С до температури матеріалу 58 °С. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 °С, при цьому температура матеріалу збільшилась до 64,8 °С, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 57,5 °С, та подальшому збільшувалася до 64,2 °С [20].

На рис. 3 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми нарізаної на кубики розміром 5х5 мм. Як видно з рис. 3 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 °С і становить в залежності від вологості 1,06 %/хв та вологовмісту 16,01%/хв, найменша за режимом 65°С – від вологості 0,41%/хв та від вологовмісту 8,36%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м² +65 °С за графіком від вологості (рис. 3 б) має максимальну швидкість сушіння 1,02 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 0,71%/хв і потім іде поступове зменшення швидкості. При вологовмісті (рис. 3 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість 15,03%/хв та при досягненні вологовмісту 1,5-1,3 кг води/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 3,54%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 °С максимальна швидкість сушіння за вологістю 1%/хв та вологовмістом 15,49%/хв.

На рисунку 4 показано зміни вологовмісту (рис. 4 а), вологості (рис. 4 б) та температури в середині шару хурми натертої стружкою. Як видно на рисунку 4, найдовший час сушіння становить 178,1 хвилин при 65°С. Найкоротший час сушіння – 60 хвилин при 100°С. Як видно з рис. 4, комбінований режим 3800 Вт/м² +65°С та

ступеневий режим 100/65°С мають менший час сушіння, ніж режим 65°С – 98,1 та 102 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м² +65 °С працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м² та теплоносієм 65 °С, після досягнення температури матеріалу 58 °С вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 52,5°С, далі вона підіймається до 63,1°С. За ступеневим режимом 100/65 °С матеріал сушили при температурі теплоносія 100 °С до температури матеріалу 58 °С. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 °С, при цьому температура матеріалу збільшилась до 58,3 °С, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 47,4 °С, та подальшому збільшувалася до 60,9 °С.

На рис. 5 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми натертої стружкою. Як видно з рис. 5 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 °С і становить в залежності від вологості 1,8%/хв та вологовмісту 16,2%/хв, найменша за режимом 65°С – від вологості 0,95%/хв та від вологовмісту 11,65%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м² +65 °С за графіком від вологості (рис. 5 б) має максимальну швидкість сушіння 1,43 %/хв при увімкнутих інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості до 0,92%/хв і потім іде поступове зменшення швидкості. При вологовмісті (рис. 5 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість 14,99%/хв та при досягненні вологовмісту 1,42-1,15 кг води/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 3,66%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим ре-

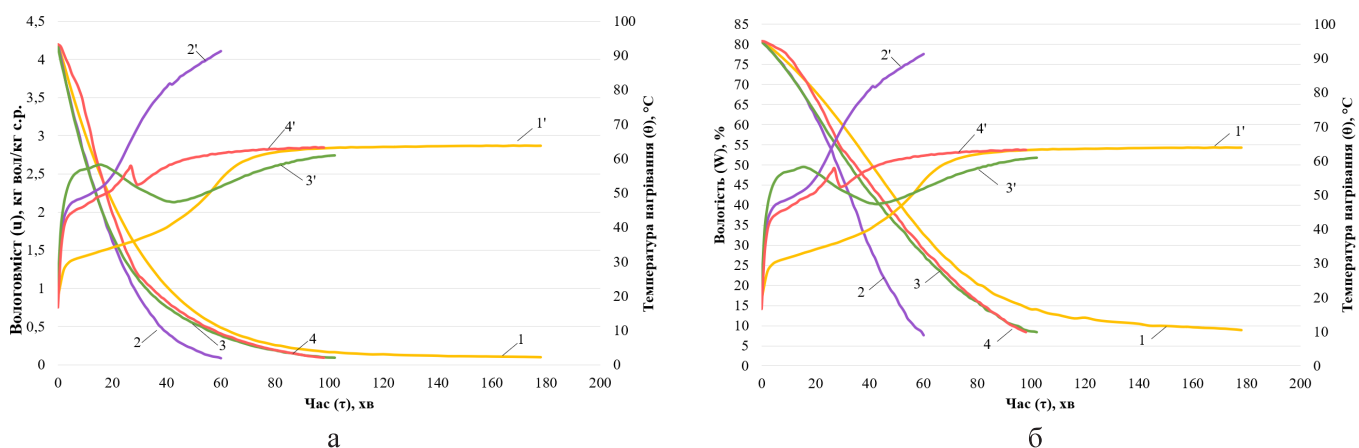


Рис. 4. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми натертої стружкою від часу в шарі $\delta \approx 5$ мм: 1 – 65 °С, 3 м/с; 2 – 100 °С, 3 м/с; 3 – 100/65 °С, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м² +65 °С, 3 м/с
Fig. 4. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmon grated into shavings over time in a layer $\delta \approx 5$ mm: 1 – 65 °С, 3 m/s; 2 – 100 °С, 3 m/s; 3 – 100/65 °С, 3 m/s; 4 – 3800W/m² +65 °С, 3 m/s

жимом 100/65 °C максимальна швидкість сушіння за вологістю 1,1%/хв та вологовмістом 13,79%/хв.

На рисунку 6 показано зміни вологовмісту (рис. 6 а), вологості (рис. 6 б) та температури в середині шару хурми нарізаною скибочками товщиною 2 мм. Як видно на рисунку 8, найдовший час сушіння становить 72 хв при 65°C. Найкоротший час сушіння – 34,1 хв при 100°C. Як видно з рис. 8, комбінований режим 3800 Вт/м² +65°C та ступеневий режим 100/65°C мають менший час сушіння, ніж режим 65°C – 47,1 та 51 хвилин відповідно. На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м² +65 °C працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м² та теплоносії 65 °C, після досягнення температури матеріалу 58 °C вимикали

інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 47,4 °C, далі вона підіймається до 58,76 °C. За ступеневим режимом 100/65 °C матеріал сушили при температурі теплоносія 100 °C до температури матеріалу 58 °C. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 °C, при цьому температура матеріалу збільшилась до 60,4°C, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 58,7 °C, та подальшому збільшувалася до 61,4 °C.

На рис. 7 представлено зміна швидкості сушіння плодів хурми нарізаною скибочками товщиною 2 мм. Як видно з рис. 7 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 100 °C і становить в залежності від вологості 3,3 %/хв та вологовмісту 24,7%/хв, най-

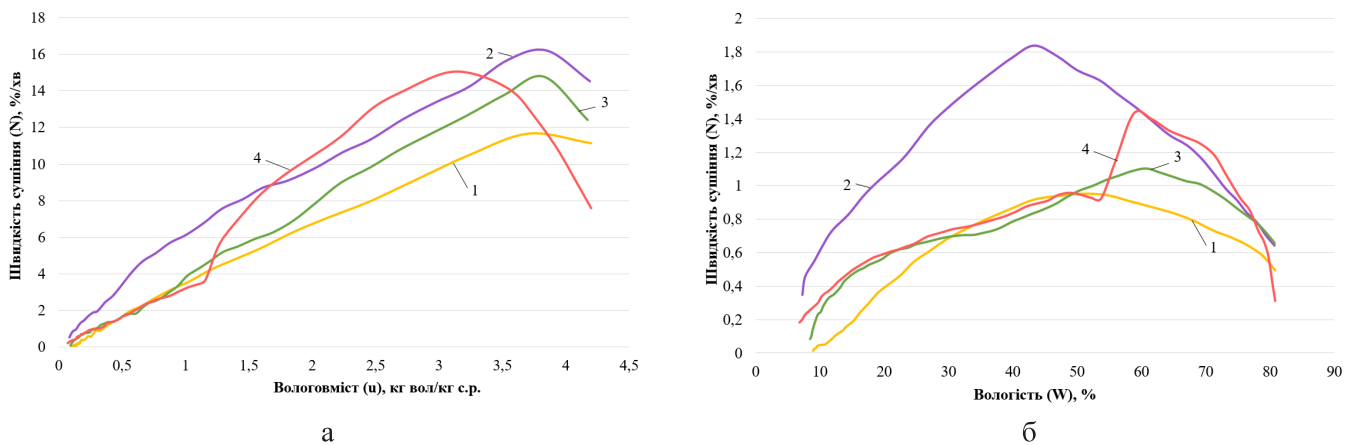


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) хурми натертої стружкою від часу в шарі $\delta \approx 5$ мм: 1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с

Fig. 5. Changes in drying rate (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmon grated into shavings over time in a layer $\delta \approx 5$ mm: 1 – 65 °C, 3 m/s; 2 – 100 °C, 3 m/s; 3 – 100/65 °C, 3 m/s; 4 – 3800W/m² +65 °C, 3 m/s

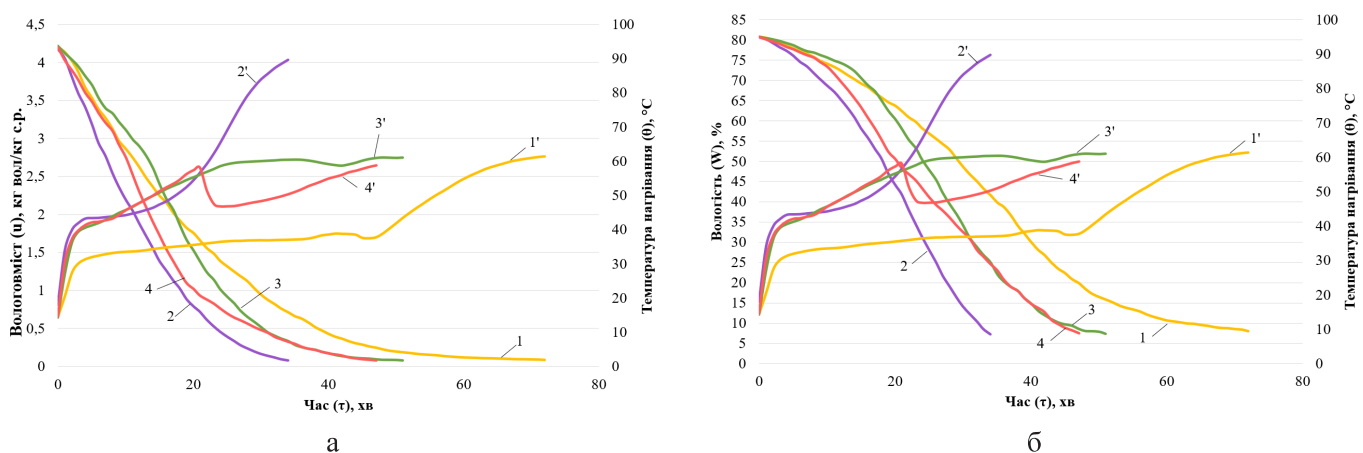


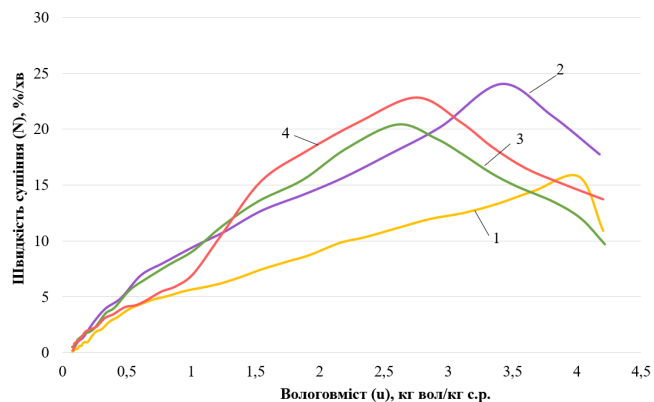
Рис. 6. Зміна вологовмісту (а), вологості (б) (1, 2, 3, 4) та швидкості сушіння (1', 2', 3', 4') хурми нарізаної скибочками $\delta \approx 2$ мм від часу в шарі: 1 – 65 °C, 3 м/с; 2 – 100 °C, 3 м/с; 3 – 100/65 °C, 3 м/с; 4 – 3800Вт/м² +65 °C, 3 м/с

Fig. 6. Changes in moisture content (a), moisture (b) (1, 2, 3, 4) and drying rate (1', 2', 3', 4') of persimmons cut into slices $\delta \approx 2$ mm over time in a layer: 1 - 65 °C, 3 m/s; 2 - 100 °C, 3 m/s; 3 - 100/65 °C, 3 m/s; 4 - 3800W/m² +65 °C, 3 m/s

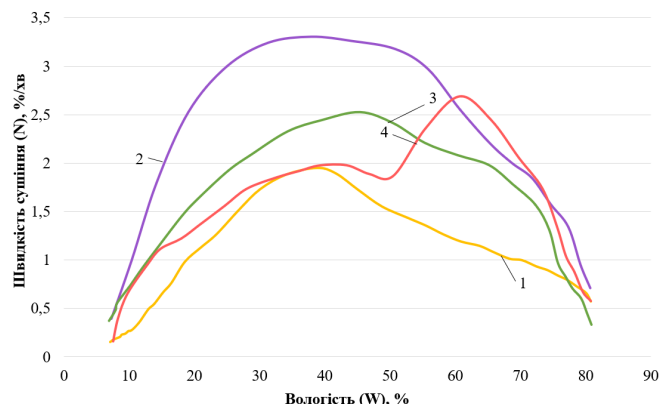
менша за режимом 65°C – від вологості $1,97\%/хв$ та від вологовмісту $15,77\%/хв$. Комбінований режим $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^{\circ}\text{C}$ за графіком від вологості (рис. 7 б) має максимальну швидкість сушіння $2,69 \%/хв$ при увімкнених інфрачервоних лампах, при вимиканні

спостерігається різке зменшення швидкості до $1,86\%/хв$ і потім іде поступове зменшення швидкості.

При вологовмісті (рис. 7 а) за комбінованим режимом можна спостерігати максимальну швидкість $22,8\%/хв$ та при досягненні вологовмісту



а



б

Рис. 7. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) від вологовмісту (а) та вологості (б) х хурми нарізаної скибочками $\delta \approx 2 \text{ мм}$ від часу в шарі: 1 – 65°C , 3 м/с; 2 – 100°C , 3 м/с; 3 – $100/65^{\circ}\text{C}$, 3 м/с; 4 – $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^{\circ}\text{C}$, 3 м/с

Fig. 7. Change in drying rate (1, 2, 3, 4) depending on moisture content (a) and moisture (b) of persimmons cut into slices $\delta \approx 2 \text{ mm}$ over time in a layer: 1 – 65°C , 3 m/s; 2 – 100°C , 3 m/s; 3 – $100/65^{\circ}\text{C}$, 3 m/s; 4 – $3800\text{W}/\text{m}^2 + 65^{\circ}\text{C}$, 3 m/s

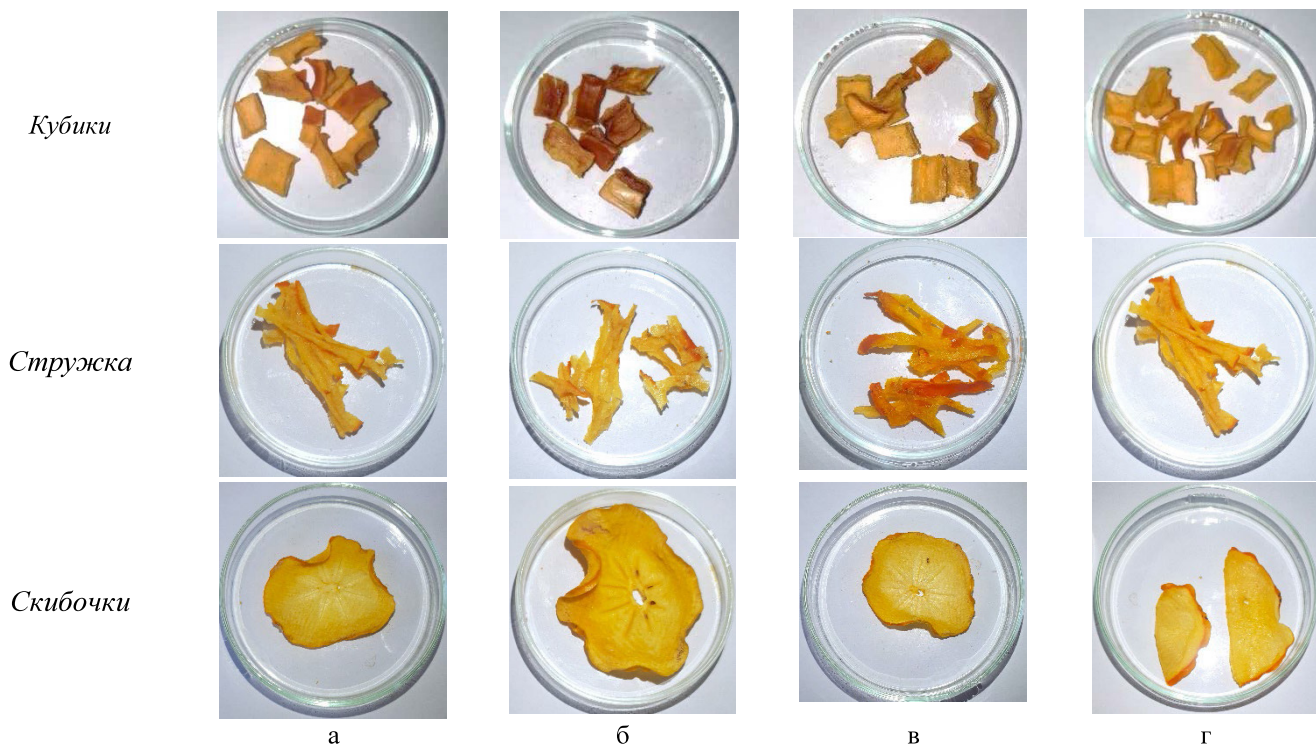


Рис. 8. Порівняння висушених зразків хурми при різних режимах: а – 65°C ; б – 100°C ; в – $100/65^{\circ}\text{C}$; г – $3800\text{Вт}/\text{м}^2 + 65^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. Comparison of dried persimmon samples under different conditions: a – 65°C ; b – 100°C ; c – $100/65^{\circ}\text{C}$; d – $3800 \text{ W}/\text{m}^2 + 65^{\circ}\text{C}$

1,54-0,88 кг вологи/кг с.р. можна спостерігати різке падіння до 5,9%/хв, що відповідає вимкненню ламп, та подальше поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 °C максимальна швидкість сушіння за вологістю 2,5%/хв та вологовмістом 20,44%/хв.

На рисунку 8 зображена висушена хурма при різних режимах 65, 100, 100/65 °C та комбінованим 3800Вт/м² +65 °C та формах. Потемніння матеріалу спостерігається при сушінні при температурі 100 °C (рис. 8 б) у кубиків, так як і смак стає підгорілим. При цьому при сушінні стружки та скибочок при температурі 100 °C потемніння кольору майже не спостерігалось, але при цьому смак погіршувався. За колір відповідають каротиноїди, які витримують температуру 100 °C при малій тривалості сушіння, але при таких режимах руйнуються вуглеводи та білки, які відповідають за смак. Найбільш збережені кольори у хурми за режимами режимом 65, ступеневим 100/65 °C та комбінованим 3800Вт/м² +65 °C (рис. 8 а, в, г). А також краще колір зберігається при сушінні стружкою та скибочками.

Висновки

У роботі виконані дослідження впливу різних режимів сушіння на плоди хурми. Визначено, що найменша тривалість сушіння за режимом 100 °C за різних форм, але при цьому спостерігається потемніння матеріалу та погіршення смаку. Найбільша тривалість при режимі 65 °C, що більше за 100 °C у 2,86 разів при сушінні кубиків, стружки у 2,96 рази та у скибочок 2,1 рази, але при цьому зберігається яскравий колір та смак. Ступеневий 100/65 °C та комбінований 3800Вт/м² +65 °C режими сушіння інтенсифікують процес порівняно з 65 °C у 1,92 та 1,63 рази для кубиків; у 1,75 та 1,82 рази для стружки; у 1,41 та 1,52 рази для скибочок. Тому доцільно використовувати комбіновані або ступеневі режими сушіння для інтенсифікації процесу. При порівнянні форми матеріалу при сушінні найменша тривалість сушіння у скибочок порівняно з іншими. При цьому сушіння скибочками добре підходить для виробництва чипсів, а стружку можна використовувати при виробництві функціональних порошків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hassan A., Joardder M. U., Karim A. A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry Scale dryers. *Thermal Science and Engineering Progress* 2025, 61, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103533>

2. Pham N. D., Khan M. I. H., Karim M. A. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. *Food chemistry*, 2020, 325, 126932. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126932>

3. Kumar C., Joardder M. U. H., Karim A., Millar G. J., Amin Z. Temperature redistribution modelling during intermittent microwave convective heating. *Procedia Engineering*, 2014, 90, 544-549. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.770>

4. 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.

5. 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.

6. Снежкін 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/tpe.4.2024.1>

7. El-Mesery H. S., El-Seesy A. I., Hu Z., Li, Y. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>

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

9. Kumar C., Joardder M. U., Farrell T. W., Millar G. J., Karim A. A porous media transport model for apple drying. *Biosystems engineering*, 2018, 176, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021>

10. Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S. Development of an okra slicing device, *Journal of Food Science and Technology*, 2007, 44 (4), 426-429.

11. Patidar A., Vishwakarma S., Meena D. Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. *Food Frontiers*, 2021, 2(1) 46-61. <https://doi.org/10.1002/fft2.64>

12. Salimi Hizaji A., Maghsoudlou Y., Jafari S. M. Application of peleg model to study effect of water temperature and storage time on rehydration kinetics of air dried potato cubes. *Latin American applied research*, 2010, 40(2), 131-136.

13. *Amiri Chayjan R.* Modeling some drying characteristics of high moisture potato slices in fixed, semi fluidized and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(6), 1229-1241.
14. *Doymaz L.* Drying behavior of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, 161-165.
15. *Okos M.R., Narasimban G., Singh R.K., Witnauer A.C.*, Food dehydration. In D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker, 1992. 144 p.
16. *Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R.* Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. *Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals*, 2025, 227-254.
17. *Zannou O., Oussou K. F., Chabi I. B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al.* Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 2025, 5(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.
18. *Петрова Ж.О., Граков Д.П.* Тепломасообмінні процеси під час одержання комбінованих каротиновмісних продуктів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2025, 47(1), С. 30-40. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>
19. *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.
20. *Петрова Ж.О., Новікова Ю.П., Слободянюк К.С., Граков О.П., Коваль І.О.* Переробка хурми (*Diospyros kaki* L.) сушінням. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19-29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
21. *Bozkir H., Ergün A. R., Serdar E., Metin G., Baysal T.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics sonochemistry*, 2019, 54, 135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
22. *Karakasova L., Babanovska-Milenkovska F., Lazov M., Karakasov B., Stojanova M.* Quality properties of solar dried persimmon (*Diospyros kaki*). *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2013, 54–59.
23. *Suzuki T., Someya S., Hu F., Tanokura M.* Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (*Diospyros kaki*). *Food Chemistry*, 2005, 93(1), 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017
24. *Luo Z.* Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (*Diospyros kaki* L.) fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(2), 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010
25. *Butt M. S., Sultan M. T., Aziz M., Naz A., Ahmed W., Kumar N., Imran M.* Persimmon (*Diospyros kaki*) fruit: hidden phytochemicals and health claims. *EXCLI journal*, 2015, 14, 542–561. Doi: 10.17179/excli2015-159
26. *Anjum N., Bhat A., Hameed F.* Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (*Diospyros kaki* L.) pulp. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 2021, 22(39-40), 67-76.
27. *Jang I. C., Oh W. G., Ahn G. H., Lee J. H., Lee S. C.* Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit. *Food science and biotechnology*, 2011, 20, 71-77. Doi:10.1007/s10068-011-0010-0
28. *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>.
29. *Zhou M., Chen J., Bi J., Li X., Xin G.* The roles of soluble poly and insoluble tannin in the enzymatic browning during storage of dried persimmon. *Food Chemistry*, 2022, 366, 130632. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632>
30. *Xu Y., Liu C., Yang X., Wu K., Gong B.* Genome-wide microsatellite characterization and marker development in *Diospyros oleifera*. *Industrial Crops and Products*, 2023, 203, 117182. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050955>
31. *Lalou S., Ordoudi S. A., Mantzouridou F. T.* On the effect of microwave heating on quality characteristics and functional properties of persimmon juice and its residue. *Foods*, 2021, 10(11), 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 <https://doi.org/10.3390/foods10112650>
32. *Hafizov G., Hafizov S., Hafizov R.* Processing Methods of Dried Persimmons. *Preprints*, 2023. doi:10.20944/preprints202309.1119.v1
33. *Kim J. H., Chung I. K., Kim H. Y., Kim K. M.* Comparison of the quality of dried persimmon (*Diospyros kaki* THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives. *Food Science & Nutrition*, 2018, 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673
34. *Kang W. W., Kim J. K., Oh S. L., Kim J. H., Han J. H., Choi J. U.* Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2023, 33(2), 386–391. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386>

35. Senadeera W., Adiletta G., Önal B., Di Matteo M., Russo P. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*, 2020, 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101
36. Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S. K., Li S. B., Liu Z. L., Wang H., Chen X.J., Xiao H. W. Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity. *Plants*, 2022, 11(19), 2500. <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
37. Dağdeviren A., Acar B., Alhammadi A., Roshanaei K., Coşkun T., İnanç Ö., Özkaymak M. Freeze-drying of persimmon (*diospyros kaki*) slices investigation of drying characteristics. *Politeknik Dergisi*, 2021, 26(2), 487-494. <https://doi.org/10.2339/politeknik.949139>
38. Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, V.89, Is.4., 2332-2346 <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
39. Borah M. S., Raj G. B., Tiwari A., Dash K. K. Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 14, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816>
40. Ткаченко С. Й., Снівак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND MATERIAL SHAPE DURING DRYING OF PERSIMMON (DIOSPYROS KAKI L.)

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), **Novikova Yu.P²**, PhD (Engin.)

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine

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, yulianovikova3@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.3>

Today, the world is trying to solve the problem of preserving biologically active components in the process of processing food raw materials using traditional drying methods. Drying is a complex and energy-intensive technological process. And in the future, the problem of reducing energy consumption for drying processes arises. Therefore, there is an urgent need to create and widely implement modern energy-efficient heat technologies that reduce energy consumption for drying processes and allow micro- and macroelements to be preserved in the dried product. Products containing sufficient amounts of micro- and macroelements beneficial to the human body can reduce the risk of chronic diseases and improve physical health and mental well-being.

The most common biologically active substances are carotenoids, which are classified as antioxidants. Carotenoids have significant potential in the food, cosmetics and pharmaceutical industries. Carotenoids are a type of terpenoid pigment that are primarily responsible for the bright yellow, orange and red colours of fruits and flowers.

Persimmon (*Diospyros kaki* L.) is a subtropical fruit that is a source of beta-carotene, vitamins A and E, ascorbic acid, rich in carbohydrates, tannins and phenolic compounds, is a good source of fibre, and also has powerful antioxidant properties.

Convective drying is one of the best methods for drying carotene-containing materials such as persimmons, but it

usually takes a long time, which should be reduced to better preserve functional properties. Therefore, the *aim of this work* is to study combined drying methods and material forms to reduce the duration.

The work involved conducting drying studies on an experimental convective stand for persimmons.

The results show that the shortest drying time is achieved at 100 °C for different forms, but this is accompanied by darkening of the material and deterioration of taste. The longest duration is at 65 °C, which is 2.86 times longer than 100 °C when drying cubes, 2.96 times longer when drying shavings, and 2.1 times longer when drying slices, but the bright colour and taste are preserved. The 100/65 °C stepwise and 3800W/m² +65 °C combined drying modes intensify the process compared to 65 °C by 1.92 and 1.63 times for cubes; by 1.75 and 1.82 times for shavings; 1.41 and 1.52 times for slices. Therefore, it is advisable to use combined or step drying modes to intensify the process. When comparing the shape of the material during drying, slices have the shortest drying time compared to others. At the same time, drying in slices is well suited for the production of chips, and shavings can be used in the production of functional powders.

Ref. 40, figure 8.

Keywords: convective drying, infrared radiation, effective drying modes, carotenoids, persimmon.

1. Hassan A., Joardder M. U., Karim A. A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry Scale dryers. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 61, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103533>

2. Pham N. D., Khan M. I. H., Karim M. A. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying. *Food chemistry*, 2020, 325, 126932. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126932>

3. Kumar C., Joardder M.U. H., Karim A., Millar G.J., Amin Z. Temperature redistribution modelling during intermittent microwave convective heating. *Procedia Engineering*, 2014, 90, 544-549. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.770>

4. 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.

5. 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.

6. *Snieszkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V.* Intensyvni sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnyim ta kombinovanyim 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/tpe.4.2024.1> (in Ukr.).
7. *El-Mesery H. S., El-Seesy A. I., Hu Z., Li, Y.* Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
8. *Inyang U., Oboh I., Etuk B.* Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
9. *Kumar C., Joardder M.U., Farrell T.W., Millar G.J., Karim A.* A porous media transport model for apple drying. *Biosystems engineering*, 2018, 176, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.021>
10. *Owolarafe O.K., Muritala O.A., Ogunsina B.S.* Development of an okra slicing device, *Journal of Food Science and Technology*, 2007, 44 (4), 426-429.
11. *Patidar A., Vishwakarma S., Meena D.* Traditional and recent development of pretreatment and drying process of grapes during raisin production: A review of novel pretreatment and drying methods of grapes. *Food Frontiers*, 2021, 2(1), 46-61. <https://doi.org/10.1002/fft2.64>
12. *Salimi Hizaji A., Maghsoudlou Y., Jafari S. M.* Application of peleg model to study effect of water temperature and storage time on rehydration kinetics of air dried potato cubes. *Latin American applied research*, 2010, 40(2), 131-136.
13. *Amiri Chayjan R.* Modeling some drying characteristics of high moisture potato slices in fixed, semi fluidized and fluidized bed conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(6), 1229-1241.
14. *Doymaz L.* Drying behavior of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69, 161-165.
15. *Okos M.R., Narasimban G., Singh R.K., Witnauer A.C.* Food dehydration. In: D.R. Heldman and D.B. Lund (Eds) *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker, 1992. 144p.
16. *Rane B. R., Amkar A. J., Patil V. S., Vidhate P. K., Patil A. R.* Opportunities and Challenges in the Development of Functional Foods and Nutraceuticals. *Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals*, 2025, 227-254.
17. *Zannou O., Oussou K.F., Chabi I.B., Alamou F., Awad N. M., Miassi Y. E., et al.* Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 2025, 5(1), 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.002>.
18. *Petrova, Z., & Grakov, D.* (2025). Heat and mass transfer processes during the production of combined carotene-containing products [Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia kombinovanykh karotynovmisnykh produktiv]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 47(1), 30-40. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.3>
19. *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.
20. *Petrova Zh.O., Novikova Yu.P., Slobodianiuk K.S., Hrakov O.P., Koval I.O.* Pererobka khurmy (*Diospyros kaki* L.) sushinniam [Processing of persimmon (*Diospyros kaki* L.) by drying]. *Scientific Works*, 2024, 88(1), 19-29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955> (in Ukr.).
21. *Bozkir H., Ergün A. R., Serdar E., Metin G., Baysal, T.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics sonochemistry*, 2019, 54, 135-141. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.02.006
22. *Karakasova L., Babanovska-Milenkovska F., Lazov M., Karakasov B., Stojanova M.* Quality properties of solar dried persimmon (*Diospyros kaki*). *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2013, 54-59.
23. *Suzuki T., Someya S., Hu F., Tanokura M.* Comparative study of catechin compositions in five Japanese persimmons (*Diospyros kaki*). *Food Chemistry*, 2005, 93(1), 149-152. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.10.017
24. *Luo Z.* Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of postharvest persimmon (*Diospyros kaki* L.) fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(2), 285-291. DOI: 10.1016/j.lwt.2005.10.010
25. *Butt M. S., Sultan M. T., Aziz M., Naz A., Ahmed W., Kumar N., Imran M.* Persimmon (*Diospyros kaki*) fruit: hidden phytochemicals and health claims. *EXCLI journal*, 2015, 14, 542-561. Doi: 10.17179/excli2015-159
26. *Anjum N., Bhat A., Hameed F.* Effect of drying methods on chemical composition, color and bioactive compounds of persimmon (*Diospyros kaki* L.) pulp. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 2021, 22(39-40), 67-76.

27. Jang I. C., Oh W. G., Ahn G. H., Lee J. H., Lee S. C. Antioxidant activity of 4 cultivars of persimmon fruit. *Food science and biotechnology*, 2011, 20, 71-77. Doi:10.1007/s10068-011-0010-0
28. 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>.
29. Zhou M., Chen J., Bi J., Li X., Xin G. The roles of soluble poly and insoluble tannin in the enzymatic browning during storage of dried persimmon. *Food Chemistry*, 2022, 366, 130632. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130632>
30. Xu Y., Liu C., Yang X., Wu K., Gong B. Genome-wide microsatellite characterization and marker development in *Diospyros oleifera*. *Industrial Crops and Products*, 2023, 203, 117182. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050955>
31. Lalou S., Ordoudi S. A., Mantzouridou F. T. On the effect of microwave heating on quality characteristics and functional properties of persimmon juice and its residue. *Foods*, 2021, 10(11), 2650. DOI: 10.3390/foods10112650 <https://doi.org/10.3390/foods10112650>
32. Hafizov G., Hafizov S., Hafizov R. Processing Methods of Dried Persimmons. *Preprints*, 2023. doi:10.20944/preprints202309.1119.v1
33. Kim J. H., Chung I. K., Kim H. Y., Kim K. M. Comparison of the quality of dried persimmon (*Diospyros kaki* THUNB.) treated with medicinal plant extracts and food additives. *Food Science & Nutrition*, 2018, 6(8), 1991-1998. DOI: 10.1002/fsn3.673
34. Kang W. W., Kim J. K., Oh S. L., Kim J. H., Han J. H., Choi J. U. Physicochemical characteristics of Sangju traditional dried persimmons during drying process. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2023, 33(2), 386–391. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2004.33.2.386>
35. Senadeera W., Adiletta G., Önal B., Di Matteo M., Russo P. Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*, 2020, 9(1), 101. doi: 10.3390/foods9010101
36. Yang K. W., Wang D., Vidyarthi S. K., Li S. B., Liu Z. L., Wang H., Chen X.J., Xiao H. W. Pulsed vacuum drying of persimmon slices: Drying kinetics, physicochemical properties, microstructure and antioxidant capacity. *Plants*, 2022, 11(19), 2500. <https://doi.org/10.3390/plants11192500>
37. Dağdeviren A., Acar B., Alhammedi A., Roshanaei K., Coşkun T., İnanç Ö., Özkaymak M. Freeze-drying of persimmon (*diospyros kaki*) slices investigation of drying characteristics. *Politeknik Dergisi*, 2021, 26(2), 487-494. <https://doi.org/10.2339/politeknik.949139>
38. Polat A., Taskin O., Izli N. Assessment of freeze, continuous, and intermittent infrared drying methods for sliced persimmon. *Journal of Food Science*, 2024, V.89, Is.4, 2332-2346 <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16994>
39. Borah M. S., Raj G. B., Tiwari A., Dash K. K. Effect of intermittent microwave convective drying on quality characteristics of persimmon fruit. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 14, 100816. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100816>
40. 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.).

Отримано 29.07.2025

Received 29.07.2025

Прийнято до друку 05.08.2025
Accepted for publication 05.08.2025