

HEAT AND MASS TRANSFER IN DRYING OF MELON (CUCUMIS MELO L.)

ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДИНИ (CUCUMIS MELO L.)

Natalia Dabizha¹

Natalia Dmytrenko²

Olena Husarova³

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-602-7-7>

Abstract. This research studied of heat and mass transfer in drying process of melon to a low residual moisture content. Considering the short fresh storage life of melons and the need to utilise waste, drying is an effective processing method. The presence of thermolabile substances in melons limits the intensification of drying by increasing the temperature, and prolonged heat exposure causes the destruction of vitamins, caramelisation of sugars and the formation of melanoids. *The aim of this study* is to determine the regularities of heat and mass transfer during the dehydration of melon pulp in order to develop convective drying modes to low residual moisture content. The developed modes ensure minimisation of energy consumption, as well as preservation of the natural composition of melon and high quality of the product (chips). *Materials and methods.* The Ananas variety was used to study the characteristics of melon pulp dehydration. The initial relative humidity of fresh melon pulp was determined according

¹ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies,
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

² Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies,
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

³ Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,
Department of Chemical Engineering and Oil Refining Industry,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”;
Senior Researcher, Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies,
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

to DSTU 7804:2015 and varied between 92.9% and 94.1%. The study of the hygrothermal equilibrium state of melons was carried out using the Van Bamenlen tensometric (static) method. The determination of heat consumption for water evaporation from samples and their heat capacity was carried out on a DMKI-01 differential microcalorimeter. Heat capacity was determined with an accuracy of at least 2%, according to DSTU ISO 11357-4:2010, using a step-by-step scanning method every 5 °C. Research into the main regularities of heat and mass transfer in the convective drying process of melons was carried out on an experimental drying stand with an automatic information collection and processing system. *Research results.* The sorption and thermophysical properties of melon parenchyma tissues were determined. It was found that the energy consumption for desorption of bound moisture increases with decreasing moisture content. A peak exothermic effect was detected in the moisture content range of (0.37...0.59) kg/kg of dry matter, which is probably associated with the crystallisation of melon sugars. It is the crystallisation of sugars that explains the crispy structure of crisps, their improved taste and shelf life. Based on data on the kinetics of drying melon parenchyma tissues, the *Rb* drying process optimisation criterion and heat flows on the material surface were calculated. Based on data on the kinetics of drying melon parenchyma tissues at drying agent temperatures of 60 °C and 80 °C, the drying process optimisation criterion *Rb* and heat flows on the material surface were calculated. It has been shown that at the beginning of the drying process, a significant part of the energy is temporarily spent on heating the wet material, then the heat is spent mainly on moisture evaporation, as evidenced by the low values of the optimisation criterion *Rb*. When the material reaches a moisture content of 2.60 kg/kg dry weight, the *Rb* criterion values increase sharply and the material heats up, indicating the advisability of lowering the temperature of the drying agent for rational use of heat and keeping the product quality. *Conclusions.* Based on comprehensive research, a two-stage melon drying regime at temperatures of 80/60 °C has been proposed. The use of a high temperature of 80 °C in the first stage intensifies the dehydration process, and its reduction to 60 °C in the second stage, after the material reaches a temperature of 50 °C, prevents undesirable changes in melon tissues and the destruction of thermolabile substances. The developed mode allows you to obtain melon chips with a natural colour and taste, light brittleness and a delicate crunch.

1. Вступ

Агропромисловий сектор, основою якого є сільське господарство, забезпечує промисловість сировиною, а населення – високоякісними та безпечними харчовими продуктами. Одним з таких продуктів є плоди дині, які традиційно вирощують у східно-південних районах України. Крім вишуканого смаку, ніжного аромату і соковитої м'якоти, диня має лікувальні й профілактичні властивості та є цінним дієтичним продуктом. Однак, через короткий термін зберігання плодів зібраний врожай потребує швидкої реалізації чи перероблення на продукти з подовженим терміном зберігання. Додатково виникає проблема утилізації м'якоти, яка залишається після вилучення насіння, що заготовлюється як матеріал для відновлення посівного фонду.

Найпоширенішою технологією перероблення та збереження рослинної сировини є сушіння нагрітим повітрям, під час якого відбувається видалення надлишкової вологи з матеріалу до рівня, при якому припиняється мікробне псування та мінімізується ферментативна активність. Проте якість готового продукту значною мірою залежить від тепловологісних параметрів та швидкості ведення процесу зневоднення, недотримання яких може призвести до небажаних фізико-хімічних змін, деформації тканин, активації ферментативних процесів потемніння або мікробного розмноження. У результаті відбувається погіршення смакових та органолептичних властивостей.

Плоди дині за своєю біологічною та хімічною природою чутливі до дії підвищених температур, тобто термолабільні. У зв'язку з цим виникає необхідність ретельного вибору оптимального з точки зору збереження якості режиму сушіння, при якому температура нагріву матеріалу не перевищуватиме гранично допустиму.

Враховуючи, що сушіння є важливим і досить енерговитратним етапом у багатьох технологіях перероблення рослинних матеріалів, дослідження зневоднення сировини спрямовані на підвищення енергоефективності процесу та забезпечення одержання продукту високої якості є актуальним науково-технічним завданням.

2. Характеристика дині як об'єкту сушіння

Диня є термолабільним колоїдним капілярно-пористим матеріалом, що складається з різних за своєю структурою та складом частин.

Плоди мають шкірку, ніжну соковиту м'якоть і насіннєве гніздо з насінням у жорсткій оболонці.

М'якоть дині залежно від сорту має різні кольори та щільність, багата на цінні біологічно активні речовини. Хімічний склад м'якоти дині наведено на рис. 1 [1–6].

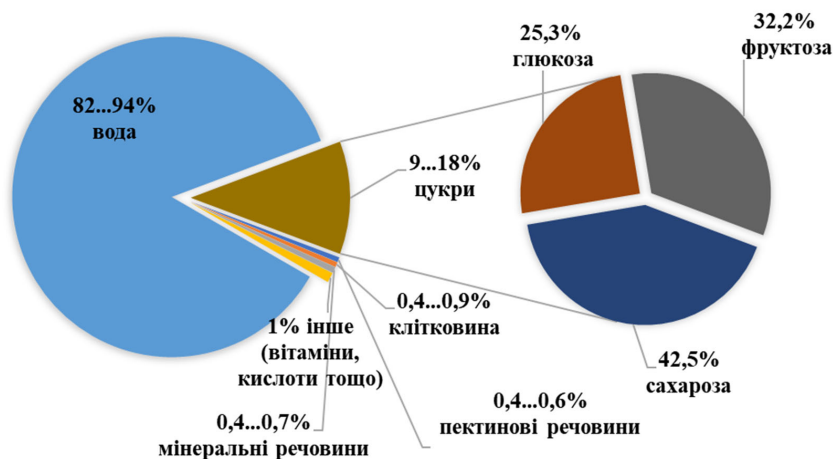


Рис. 1. Середній хімічний склад дині, % на сиру масу

Цукри в дині представлені (у % до загальної кількості цукрів, рис. 1): глюкозою, фруктозою та сахарозою. Харчова цінність дині посилюється наявністю кислот (фолієва, аскорбінова тощо), ароматичних сполук, мінеральних речовин (калій, магній, кальцій, фосфор, хлор, сірка, залізо, цинк, йод, марганець, фтор, мідь тощо), вітамінів (A, B₁, B₂, C, PP).

Завдяки високому вмісту фолієвої кислоти та заліза диня сприяє профілактиці атеросклерозу, підтримує кровотворення та нормалізує перебіг окислювальних процесів [1].

Такий унікальний склад робить м'якоть дині цінною для споживання частиною плода. М'якоть використовують для виготовлення цукатів, меду, варення, соків, компотів тощо. Диню сушать природним і штучним способом з отриманням продуктів із проміжною воло-

гістю ((15...30)% – в'ялена диня, сухофрукти) та низькою вологістю ((5...8)% – чипси) [1–6].

Фруктово-овочеві чипси – це тонкі хрусткі скибочки із фруктів або овочів одержані сушінням. Такі чипси стають дедалі популярнішими серед споживачів, так як вони є здоровою альтернативою традиційним картопляним чипсам, мають корисний склад, низький вміст жиру, тривалий термін зберігання та різноманітність смаків, є зручними для легкого перекусу в дорозі чи на роботі.

3. Аналіз публікацій присвячених особливостям сушіння плодів дині

На сьогоднішній день існує багато способів сушіння дині, які передбачають зневоднення як натуральної, так і попередньо обробленої сировини перед сушінням, різні методи зневоднення та їх комбінування, використання різної форми нарізки (скибочки, кубики, кульки тощо).

Так, наприклад, у статті [7] наведені результати експериментальних досліджень процесу сушіння скибочок дині завтовшки 15, 18 та 21 мм в камерно-конвективній сушарці за температури сушильного агента (70...80) °С. Встановлено, що оптимальна за якістю кінцевого продукту товщина скибочок становить 15 мм. Запропонований осцилювальний режим зневоднення з почерговим нагріванням та охолодженням продукту.

У результаті досліджень закономірностей вологовидалення під час сушіння плодів дині розроблені стадійні режими зневоднення за температури сушильного агента 95/70 °С, за яких інтенсифікується процес, знижуються втрати поживних речовин та зберігається якість готового продукту [8]. Зниження температури з 95 °С до 70 °С забезпечує рівномірне видалення води без перегрівання продукту.

У дослідженні [9] визначений вплив температури, швидкості сушильного агента та попередньої обробки сировини бланшуванням і осмотичною дегідrataцією на ефективність випаровування води та збереження вітамінів під час зневоднення дині в інфрачервоній сушарці з рекуперацією сонячної теплоти. Оптимальні температури, при яких не відбувається потемніння сировини та втрати біологічно активних речовин, становлять (50...70) °С.

Авторами [10, 11] проведені дослідження щодо впливу попередньої обробки скибочок дині ультразвуком на тривалість зневоднення та якісні показники готового продукту під час сушіння за температур від 50 °C до 80 °C. За результатами дослідження виявлена доцільність застосування ультразвуку для попередньої обробки дині.

Для часткового зневоднення дині широко використовують осмотичний спосіб попередньої обробки сировини [12; 13], що дозволяє сушити матеріал зі зниженим початковим вологовмістом. Це скорочує час сушіння, заощаджує енерговитрати та дозволяє уникнути тривалого впливу теплоти на продукт. Проте, використання як осмотичних рідин розчинів цукрів і солей призводить до втрати водорозчинних вітамінів, зменшення вмісту органічних кислот, проникненню сторонніх речовин у тканини дині, що змінює її натуральний смак і хімічний склад.

У країнах зі спекотним кліматом диню зневоднюють сонячно-повітряним способом після попередньої обробки, проте його ефективність обмежена залежністю від несприятливих погодних умов, тривалістю процесу та ризиком мікробіологічного обсіменіння.

Як видно з літературного огляду, чутливість дині до високих температур, через наявність у складі термолабільних речовин, обмежує інтенсифікацію сушіння шляхом підвищення температури, а довготривалий тепловий вплив викликає руйнування вітамінів, карамелізацію цукрів і утворення меланоїдинів. Зростання концентрації цукрів у клітинному соці уповільнює зневоднення, підвищуючи енерговитрати.

Розглянуті дослідження способів обробки та сушіння дині викликають значний інтерес. Проте, слід зазначити, що дослідження з вибору оптимальних з точки зору ефективного використання теплоти технологічних параметрів процесу сушіння дині відсутні. Проведення всебічних досліджень властивостей дині як об'єкта сушіння з визначенням термодинамічних та теплофізичних характеристик дозволяє за кінетикою зневоднення розраховувати критерій оптимізації сушіння та теплові потоки на поверхні матеріалу в процесі сушіння. Результати таких досліджень є основою для розроблення енергоефективних режимів зневоднення і використовуються при проєктуванні та оптимізації сушильних установок.

Метою досліджень є визначення закономірностей тепломасообміну під час зневоднення м'якоті дині для розроблення режимів конвективного сушіння до низької залишкової вологості, які забезпечать мінімізацію енерговитрат, а також збереження природнього складу дині та високу якість продукту.

4. Матеріали та методи

Для дослідження особливостей зневоднення м'якоті дині використовували сорт «Ананас». Перед дослідями плоди мили проточною водою і розрізали навпіл. Насіння видаляли, з м'якоті робили зрізи паренхімних тканин завтовшки до 5 мм. Досліджувані зразки м'якоті дині мали високий ступінь біологічної стиглості: були розпливчаті, соковиті, солодкі на смак.

Вміст води в матеріалі визначали за ДСТУ 7804:2015 шляхом сушіння зразків в бюксах до постійної маси в сушильній шафі з температурою (100...105) °С фіксуючи масу бюкси з навішенням до висушування m_1 , масу бюкси з навішенням після висушування m_2 , масу пустої бюкси m_0 .

При вирішенні задач, що пов'язані зі змінюванням кількості води в матеріалі в процесі його сушіння, в розрахунках швидкості сушіння, критерію оптимізації та густини теплових потоків використовували вологовміст u – відношення маси води m_w до маси сухого матеріалу $m_{с.м.}$, кг/кг с.м.:

$$u = \frac{m_w}{m_{с.м.}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \quad (1)$$

При вирішенні задач, що пов'язані з порівнянням зразків із однаковою масою, при розрахунках маси сухого матеріалу використовували відносну вологість W – відношення маси води m_w до маси вологого матеріалу m , %:

$$W = \frac{m_w}{m} \cdot 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Перехід від вологовмісту u до відносної вологості W і від відносної вологості W до вологовмісту u здійснюється за такими формулами:

$$u = \frac{W}{100 - W} \quad \text{та} \quad W = \frac{u}{1 + u} \quad (3)$$

Визначена початкова відносна вологість зразків м'якоти діни у свіжому стані варіювалась в межах (92,9...94,1)%, що відповідає вологовмісту (13,08...16,99) кг/кг с.м.

Дослідження гігротермічного рівноважного стану діни проводилися з застосуванням тензометричного (статичного) методу Ван Бамелена з авторськими уточненнями [14]. Згідно методу зразки висушеного матеріалу в бюксах витримують в ексикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти. При певній температурі та концентрації сірчаної кислоти в ексикаторі встановлюється парціальний тиск пари p , що відповідає цій концентрації та відносному тиску p/p_s . Відносна вологість повітря визначається як $\varphi = p/p_s \cdot 100$. Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г до моменту досягнення ними постійної маси, що свідчить про настання стану рівноваги при даній температурі й відносній вологості повітря. Рівноважний вологовміст матеріалу u_p визначається як відношення маси вологи в матеріалі в рівноважному стані до маси сухого матеріалу.

Користуючись залежністю рівноважного вологовмісту матеріалу u_p від відносного тиску пари води p/p_s (ізотермами адсорбції), можна одержати дані щодо теплоти випаровування вологи різних форм і видів зв'язку з матеріалом. Рослинні тканини утримують крім вологи з фізико-механічною формою зв'язку й адсорбційно-зв'язану вологу. У разі видалення зв'язаної вологи загальні витрати енергії на випаровування визначаються ізостеричною теплотою адсорбції q_{st} , яка складається з питомої теплоти паротворення r і чистої теплоти адсорбції q_a . Ізостерична теплота адсорбції q_{st} розраховується за рівнянням Клаузіуса-Клапейрона (4), кДж/кг [15]:

$$\frac{(\partial \ln p)}{(\partial \ln T)} = \frac{q_{st}}{(RT^2)}, \quad (4)$$

де p – тиск, мм рт.ст.; T – температура, К; R – газова стала, кДж/(кг·К).

За ізотермами адсорбції, одержаним при двох і більше температурах, після заміни в рівнянні (4) рівноважного тиску p на відношення $p/p_s = \varphi$, використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона, визначається чиста теплота адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням (5), кДж/кг:

$$q_a = \left[\ln \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] R \quad (5)$$

Визначення витрат теплоти на випаровування води зі зразків матеріалу та його теплоємності проводилося на диференціальному мікрокалориметрі випаровування ДМКИ-01 [16]. Прилад являє собою сукупність функціонально поєднаних теплового блоку, аналітичних ваг, компресора, блоку електронного керування та персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням.

Питому теплоту випаровування визначали з точністю не менше 1%, за власною методикою, заснованою на синхронному вимірюванні змінування маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння. Поточні значення питомих витрат теплоти на випаровування вологи зі зразка під час сушіння вираховували після закінчення досліду за формулою (6):

$$r_i = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_{i+1})} \quad (6)$$

де r_i – питома витрати теплоти на випаровування за час сушіння від τ_i до τ_{i+1} , кДж/кг; τ_i та τ_{i+1} – поточні моменти часу процесу сушіння, с; $q(\tau)$ – тепловий потік всередині робочої камери як функція часу, кДж/с; $m(\tau_i)$ та $m(\tau_{i+1})$ – маса зразка в моменти часу τ_i та τ_{i+1} , кг.

Питому теплоємність визначали з точністю не менше 2%, за ДСТУ ISO 11357-4:2010, методом покрокового сканування через кожні 5 °С. Окремі значення питомої теплоємності вираховували після закінчення дослідів, при температурі середини температурного діапазону, за формулою (7):

$$c_i = \frac{\int_{\tau_{поч}}^{\tau_{кін}} q(\tau) d\tau}{m(t_{кін} - t_{поч})} \quad (7)$$

де c_i – питома теплоємність матеріалу при температурі середини температурного кроку, кДж/(кг·К); m – маса матеріалу, кг; $t_{поч}$ та $t_{кін}$ – температура початку та кінця температурного кроку, К.

Дослідження основних закономірностей тепло- і масообміну процесу конвективного сушіння дині проводилися на експерименталь-

ному сушильному стенді з системою автоматичного збору й обробки інформації. Після встановлення режиму сушіння підготовлені зразки розміщували на сітчастому піддоні робочої вимірювальної камери та вмикали комп'ютер для збору інформації за допомогою програми "Sooshka", яка реєструє та виводить на екран температуру сушильного агента t_c , температуру зразка t та змінювання маси зразка m під час зневоднення [17]. Дослідження проводилися за таких режимних параметрів процесу: температура сушильного агента $t_c - 60^\circ\text{C}$ і 80°C ; швидкість сушильного агента $v - 2$ м/с; вологовміст сушильного агента $d - 13$ г/кг с.п.; початкове питоме навантаження матеріалу $- 5,3$ кг/м².

За експериментальними даними з кінетики сушіння паренхімних тканин дині одержані криві сушіння $u = f(\tau)$, температурні криві $t = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $du/d\tau = f(u)$, що одержані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також $t = f(u)$.

За даними з кінетики вологообміну можливо встановити кінетику теплообміну під час сушіння дині. Розрахунок енергетичних характеристик процесу – критерію оптимізації процесу сушіння та теплових потоків на поверхні матеріалу – здійснювали за методикою викладеною в [14; 18].

Зв'язок між теплообміном і вологообміном встановлюється за основним рівнянням кінетики процесу сушіння (8):

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q_N} = \left(\frac{du}{d\tau} \right)^* (1 + Rb), \quad (8)$$

де $q^*(\tau)$ – відносна густина теплового потоку; $q(\tau)$ – потік теплоти в періоді падаючої швидкості сушіння, кВт/м²; q_N – потік теплоти за постійної (максимальної) швидкості сушіння, кВт/м²; $\left(\frac{du}{d\tau} \right)^* = \frac{1}{N} \left(\frac{du}{d\tau} \right)$ – відносна швидкість сушіння; $N = \left(\frac{du}{d\tau} \right)_N$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається за постійної (максимальної) швидкості сушіння; Rb – критерій оптимізації сушіння, який характеризує співвідношення кількості теплоти, яка витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, яка витрачена на випаровування з нього води, за нескінченно малий проміжок часу.

Число Rb розраховується за формулою (9):

$$Rb = \frac{c}{r} \left(\frac{dt}{du} \right), \quad (9)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг·К); r – питома теплота випаровування води, кДж/кг.

Змінювання густини теплового потоку $q(\tau)$ на поверхні матеріалу впродовж процесу сушіння, визначається за залежністю (10), кВт/м²:

$$q(\tau) = q^*(\tau) \cdot q_N, \quad (10)$$

де q_N – густина теплового потоку в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, визначається за (11), кВт/м²:

$$q_N = r_N \frac{m_{a.c.}}{S} \left(\frac{du}{d\tau} \right)_N, \quad (11)$$

де $m_{a.c.}$ – маса абсолютно сухого матеріалу, кг; S – площа поверхні вологого матеріалу, м².

5. Виклад основного матеріалу

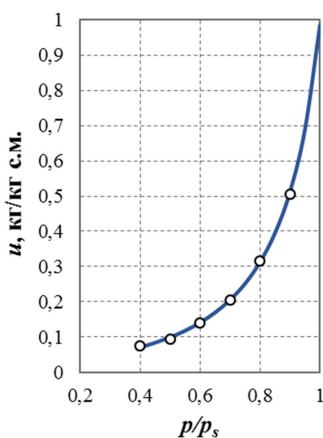
5.1. Визначення сорбційних та теплофізичних властивостей паренхімних тканин дині

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма сорбції пари води паренхімними тканинами дині за температури середовища 20 °С в діапазоні відносних тисків пари води p/p_s від 0,4 до 0,9 (рис. 2а). Ізотерма має опуклу до осі p/p_s форму, що характерно для сорбції пари води колоїдними капілярно-пористими матеріалами. Як видно з ізотерми сорбції, рівноважний вологовміст дині при $p/p_s > 0,45$ перевищує 0,084 кг/кг с.м. (8% відн.), тому під час виробництва з дині продуктів з низькою вологістю висушений матеріал необхідно упаковувати в герметичну тару для збереження заданих властивостей. При одержанні з дині продуктів з проміжною вологістю для запобігання мікробного псування вологовміст дині не повинен перевищувати 0,20 кг/кг с.м. (16,7% відн.).

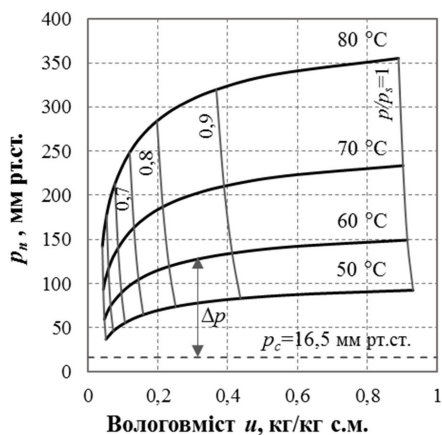
Для визначення оптимальних режимів сушіння необхідно знати параметри гігротермічного рівноважного стану матеріалу з повітрям за різних температур. Використовуючи метод характеристичних кривих, що заснований на потенційній теорії сорбції [19], за одержаною за $t = 20$ °С ізотермою сорбції визначили максимальний гігроскопічний вологовміст паренхімних тканин дині $u_{os} = 0,985$ кг/кг с.м. та розраховували значення рівноважних вологовмістів у діапазоні температур

від 50 °С до 80 °С. Слід зазначити, що ізотерми сорбції відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної вологи). У цій області тиск пари води над поверхнею матеріалу p_m відрізняється від тиску насичення та залежить від вологовмісту і температури матеріалу (рис. 2б): в міру зменшення вологовмісту і при зниженні температури p_m зменшується й при наближенні вологовмісту до 0,08 кг/кг с.м. таке зменшення стає суттєвим. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну Δp , яка визначається різницею між парціальним тиском пари води на поверхні матеріалу p_m і тиском пари води в парогазовому потокові p_c .

З ізотерм сорбції за різних температур за рівнянням (5) одержано важливий термодинамічний параметр – чисту ізостеричну теплоту адсорбції q_a , яка вимірює енергію сил зв'язку між молекулами водяної пари та матеріалом, і яка визначається як різниця питомих витрат теплоти на випаровування води з матеріалу q і теплоти випаровування вільної води r :



а)



б)

Рис. 2. Ізотерма адсорбції пари води паренхімними тканинами дині за температури 20 °С (а) та залежність парціального тиску пари води на поверхні дині від вологовмісту і температури (б)

На рис. 3а надана залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції q_a від вологовмісту паренхімних тканин дині. Як видно, теплота адсорбції поступово зростає із зменшенням вологовмісту і в області адсорбційно-зв'язаної води, починаючи від $u = 0,25$ кг/кг с.м., різко збільшується. Таким чином, витрати енергії q на десорбцію адсорбційно-зв'язаної води при досягненні матеріалом вологовмісту 0,06 кг/кг с.м. збільшуються на 13% в порівнянні з теплою випаровування вільної води r .

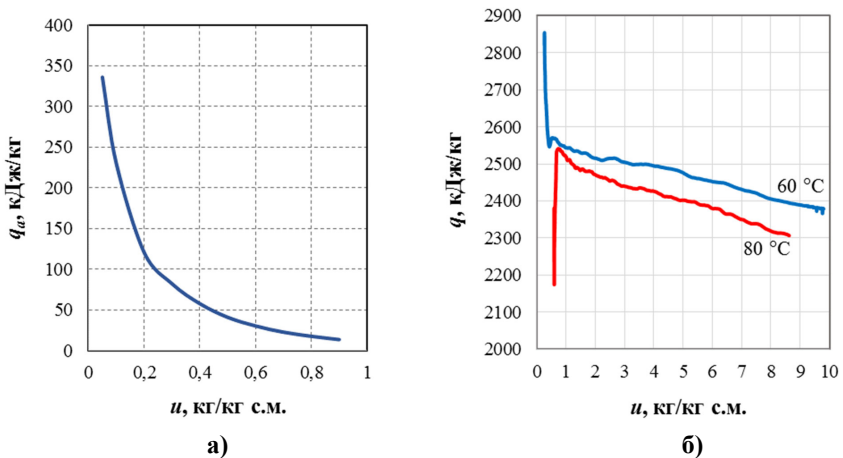


Рис. 3. Чиста ізостерична теплота адсорбції (а) та питомі витрати теплоти на сушіння (б) паренхімних тканин дині

У реальному процесі сушіння одночасно з випаровуванням вільної та зв'язаної води в матеріалі будуть відбуватися інші як ендотермічні так і екзотермічні фізико-хімічні явища та фазові перетворення, які впливають на загальні витрати енергії на зневоднення. Результати досліджень витрат теплоти на випаровування води з тканин дині в процесі сушіння опубліковані в працях [1; 5].

Дослідження витрат теплоти на випаровування води з паренхімних тканин дині проводилося при температурах конвективно-кондуктивного сушіння 60 °C та 80 °C. Як видно з наведених на рис. 3б залеж-

ностей, зі зменшенням вологовмісту експериментально одержана питома теплота випаровування води з тканин дині поступово зростає, перевищуючи відповідні табличні значення теплоти випаровування вільної води ($r_{60} = 2358$ кДж/кг, $r_{80} = 2308$ кДж/кг) в середньому на 6%, а на завершальній стадії – до 20%. Наприкінці сушіння відбувається різке зростання значень теплоти випаровування, що відповідає класичним уявленням щодо сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Під час досліджень в діапазоні вологовмістів тканин дині (0,37...0,59) кг/кг с.м. ((27...37)% відн.) спостерігався піковий екзотермічний ефект, який на думку авторів визваний процесом кристалізації цукрів дині.

При відпрацюванні технологій сушіння не завжди вдається отримати ефект кристалізації цукрів всередині висушених рослинних тканин [20], бо це залежить від наявності цукрів, здатних до кристалізації при певних технологічних параметрах. Цукри в дині значною мірою представлені глюкозою та фруктозою. Процес їх кристалізації з водного розчину простіший, бо не обтяжений, як у сахарози, утворенням «місткового зв'язку» між кільцями двох залишків моносахаридів (α -глюкози и β -фруктози) через двічі зв'язану молекулу води [21].

Результати експериментальних досліджень теплоємності паренхімних тканин дині в залежності від температури та ступеня їхнього зневоднення наведені на рис. 4 [22].

Аналіз одержаних даних виявив злам лінійності на графічних залежностях теплоємності дині від вологості тканин (рис. 4а) при досягненні матеріалом вологості $W \approx 10\%$ відн. Це явище обумовлено деградацією спіральної структури білків при втрачанні води і характерно також для інших рослинних тканин [23].

На залежностях теплоємності тканин дині від температури (рис. 4б) після зневоднення їх нижче 28% відн. спостерігаються пікові ендотермічні ефекти, які стають більш проявлені зі зменшенням вологості. Ймовірно, тут відбувається плавлення цукрів, які закристалізувалися під час сушіння дині. За довідниковими даними безводні кристали D-фруктози плавляться при (102...104) °C [24], D-глюкози – при (146...148) °C [25], сахарози – при 186 °C [26]. У природі, крім сухих кристалів, цукри існують і в розчинах. У процесі кристалізації з водного розчину цукри можуть утворювати кристалогідрати. Термічні

властивості таких кристалогідратів, зокрема, температура плавлення, будуть залежати від складу гідрату і його структури. Відомо, що моногідрат α -D-глюкози плавиться при 83 °С [25]. Тобто, цілком можливо припустити утворення кристалогідратів цукрів при зневодненні паренхімних тканин дині (рис. 3б) та їх плавлення під час наступного нагрівання тканин (рис. 4б).

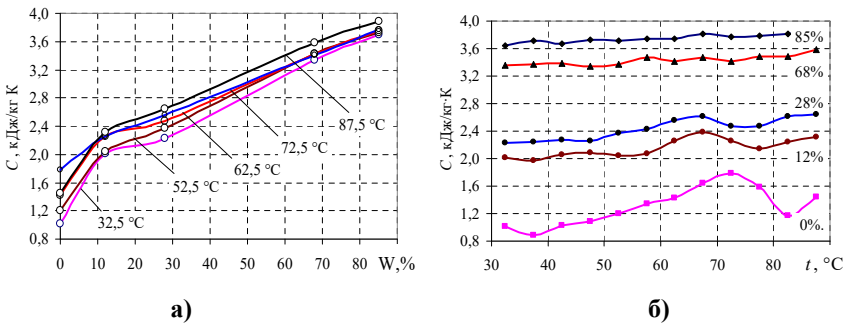


Рис. 4. Залежність питомої теплоємності паренхімних тканин дині від їхньої відносної вологості (а) та температури (б)

Шляхом лінійної апроксимації отриманих експериментальних даних в діапазоні вологості $W = (10...85)\%$ відн. та температури $t = (32,5...87,5)$ °С виведена формула залежності питомої теплоємності паренхімних тканин дині від двох параметрів (12), кДж/(кг·К):

$$c_p(W, t) = 1,2917 + 0,0266W + 0,0094t - 0,00008Wt. \quad (12)$$

5.2. Дослідження процесу конвективного сушіння паренхімних тканин дині

Результати дослідження процесу конвективного сушіння до низького залишкового вологовмісту 0,06 кг/кг с.м. в шарі товщиною $\delta = 5$ мм показали, що при підвищенні температури сушильного агента значно інтенсифікується вологовидалення [27]. Так за температури сушильного агента 60 °С тривалість процесу складала близько 205 хв (рис. 5а), а при підвищенні до 80 °С – зменшилась до 105 хв, тобто майже у 2 рази. Швидкість сушіння du/dt (рис. 5б) в початко-

вий момент максимальна і за температури сушильного агента 80 °С в 1,26 рази вища ніж за 60 °С.

Спільний аналіз кривих сушіння паренхімних тканин дині $u = f(\tau)$ і температурних кривих $t = f(\tau)$ показав, що після короткочасного (6...7 хв) прогрівання матеріалу процес сушіння можна розділити на два періоди. Перший – період постійної температури $t = const$, під час якого сушіння відбувається за температури мокрого термометра на поверхні матеріалу до досягнення критичного вологовмісту $u_{кр}$. Та другий – період температури $t = var$, яка підвищується з часом, наближуючись до температури сушильного агента. Тривалість першого періоду – приблизно 10 хв, $u_{кр}$ становить 10,85 кг/кг с.м. та 10,46 кг/кг с.м. за температур сушильного агента 60 °С і 80 °С, відповідно.

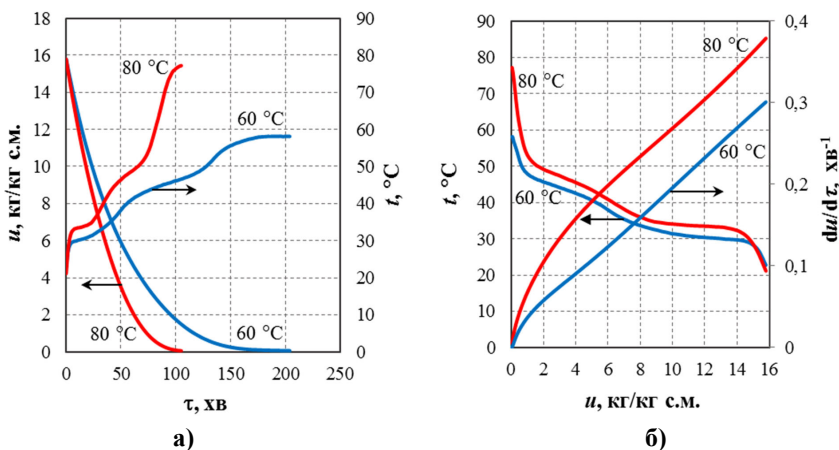


Рис. 5. Вплив температури сушильного агента на кінетику сушіння паренхімних тканин дині (режимні параметри $v = 2$ м/с; $d = 13$ г/кг с.п., $\delta = 5$ мм)

Традиційно ці періоди пов'язують зі змінюванням швидкості сушіння $du/d\tau$ і називають, відповідно, періодом постійної та періодом падаючої швидкості. Проте в даному експерименті швидкість зневоднення паренхімних тканин дині з самого початку поступово знижу-

ється (рис. 5б). Це пояснюється тим, що рослинні матеріали сильно деформуються в процесі зневоднення, в результаті відбувається зменшення площі випаровування і, як наслідок, падіння швидкості сушіння.

Аналіз експериментальних даних змінювання температури матеріалу показав, що після першого періоду нагрівання температура паренхімних тканин дині поступово підвищується зі зменшенням вологовмісту, і при досягненні вологовмістом величини максимального гігроскопічного u_{os} (0,89 кг/кг с.м. за $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 0,93 кг/кг с.м. за $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) відбувається різкий підйом температури, що пов'язаний з виділенням додаткової теплоти всередині матеріалу через процес кристалізації цукрів дині, більший перепад температур тканин дині спостерегається при вищій температурі сушильного агента.

Таким чином, дослідження з кінетики сушіння узгоджуються з дослідженнями щодо визначення теплоємності й теплоти випаровування і підтверджують наявність цукрів, що дрібно закристалізувалися всередині висушеної дині. Саме утворення мікрокристалів цукрів всередині паренхімних тканин пояснює хрустку структуру динних чипсів, підвищення їхніх смакових якостей і значний термін належного зберігання без погіршення вигляду та смаку (рис. 7).



Рис. 7. Динні чипси

5.3. Дослідження тепломасообміну процесу сушіння дині до низького залишкового вологовмісту

За результатами досліджень кінетики сушіння паренхімних тканин дині встановлено, що процес протікає в періоді падаючої швидкості. Це означає, що інтенсивність сушіння та інтенсивність теплообміну

безперервно зменшуються. При цьому коефіцієнти тепло- і масообміну змінюються в часі, а температура та вологовміст на поверхні матеріалу визначаються складними механізмами підведення теплоти і вологи (внутрішній тепломасоперенос) та відведення теплоти і вологи з поверхні в оточуюче середовище (зовнішній тепломасообмін). Визначити в цьому періоді інтенсивність теплообміну (густина теплового потоку $q(\tau)$), уникнувши визначення коефіцієнта теплообміну, можливо за допомогою основного рівняння кінетики сушіння (8).

Для оптимізації інтенсивності теплопідведення в процесі сушіння паренхімних тканин дині за встановленою залежністю $t = f(u)$ (рис. 5б), а також за експериментально визначеними питомими теплоємністю дині (формула (7)) та витратами теплоти на випаровування з неї вологи (рис. 3б) за формулою (9) розраховано змінювання критерію оптимізації Rb для різних температурних режимів (рис. 8а) [27].

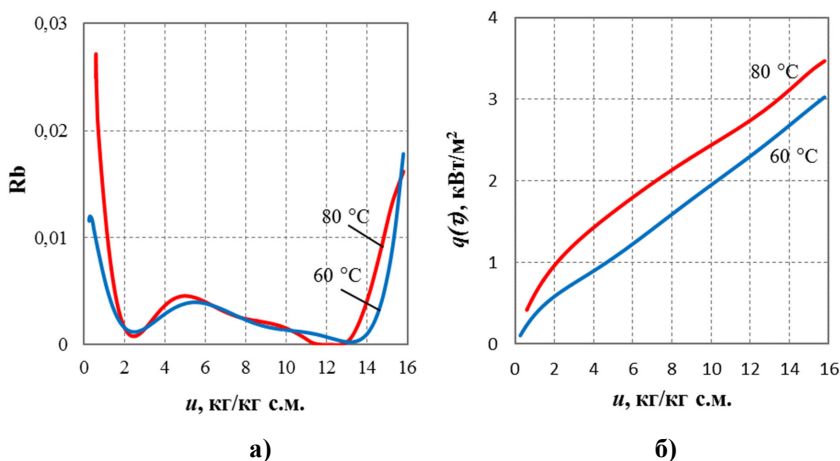


Рис. 8. Число Rb (а) та густина теплового потоку (б) в залежності від вологовмісту паренхімних тканин дині в процесі їх сушіння за різних температур сушильного агента

Одержані чисельні значення Rb змінюються в межах від 0,27 до 0,001, що добре узгоджується з літературними даними. Зазвичай, в процесі сушіння рослинних матеріалів значення Rb знаходяться в межах

від 0,2 до 0,003. Наприклад, при конвективному сушінні яблука від вологовмісту 6,00 кг/кг с.м. до 0,08 кг/кг с.м. чисельні значення Rb змінювались від 0,10 до 0,003, а столового буряка при сушінні від 7,00 кг/кг с.м. до 0,08 кг/кг с.м. – від 0,13 до 0,001 [28].

Оскільки нагрівання матеріалу за своєю сутністю є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливого значення. Як видно з рис. 6а, на початку процесу сушіння, що відповідає періоду прогрівання матеріалу, Rb має досить великі значення. У процесі сушіння Rb зменшується до нуля – теплота витрачається переважно на випаровування вологи з матеріалу, а не на його нагрівання. При досягненні матеріалом вологовмісту 2,60 кг/кг с.м. критерій Rb різко зростає, відбувається нагрівання матеріалу, що при температурах сушіння вищих за 60 °C призводить до погіршення органолептичних показників висушеної діни. З цього моменту доцільно знижувати температуру сушильного агента не лише для більш раціонального використання енергії, але й для позитивного впливу на якість готового продукту.

За одержаними даними щодо змінювання критерію оптимізації в процесі сушіння паренхімних тканин діни за формулою (10) розраховане змінювання густини теплового потоку $q(\tau)$ за різних температур сушильного агента в залежності від вологовмісту (рис. 8б). Теплові потоки визначали за експериментально одержаними теплофізичними характеристиками (теплоємністю та теплою випаровування), що дозволило, крім теплоти пароутворення, врахувати реальні витрати теплоти в процесі сушіння діни, а саме: теплоту руйнування зв'язків молекул води з іншими речовинами рослинної тканини і теплоту адсорбції пари води матеріалом.

З графіків (рис. 8б) видно, що густина теплових потоків залежить від температури сушильного агента: більші значення $q(\tau)$ відповідають режиму з вищою температурою. Тобто, ще раз підтверджується необхідність зниження температури сушильного агента на завершальній стадії процесу сушіння. Зі зниженням вологовмісту паренхімних тканин діни густина теплових потоків на поверхні зменшується, і значить, можливо зменшити підведення енергії до сушильної камери задля більш раціонального її використання. За одержаними величинами теплових потоків можна розрахувати кількість теплоти, яку необхідно витратити в сушарці на нагрівання та зневоднення матеріалу.

Проведені комплексні дослідження дозволили розробити енерго-ефективну теплотехнологію сушіння дині до низького залишкового вологовмісту для одержання чипсів високої якості, особливістю якої є проведення процесу зневоднення за двоступеневим режимом за температур сушильного агента 80/60 °С. Використання високої температури на першій стадії позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість. Обмеження використання підвищеної температури сушильного агента обумовлене гранично допустимою температурою нагріву матеріалу, яка під час сушіння дині в шарі за безперервного нагрівання не повинна перевищувати 60 °С [14]. Тому після досягнення матеріалом температури 50 °С (температура на поверхні наближується до 60 °С) необхідно знижувати температуру зневоднювання. Проте під час низькотемпературного сушіння до залишкового вологовмісту 0,06 кг/кг с.п. виявляється значний вплив вологовмісту сушильного агента на інтенсивність процесу. Як видно з рис. 2б, у міру зменшення вологовмісту на поверхні матеріалу зменшується рушійна сила масообміну $\Delta p = p_m - p_c$. Під час досушування за температури 60 °С необхідно враховувати цей фактор, тому що вологовміст сушильного агента значно залежить від тепловолігісних параметрів атмосферного повітря. Так, аналіз літніх температур і вологості повітря в Україні показав, що їх коливання значно впливають на вологовміст сушильного агента, який може змінюватися в межах від 8 г/кг с.п. до 20 г/кг с.п., а парціальний тиск водяної пари відповідно буде змінюватися від 28 мм рт. ст. до 33 мм рт. ст. Коливання масообмінного напору Δp між матеріалом і сушильним агентом у даному випадку призведе до коливання швидкості зневоднення, що вплине на тривалість процесу і енерговитрати.

У дослідженні [29] встановлено, що для здійснення сушіння за двоступеневими режимами необхідні менші витрати теплоти ніж за однією температурою. Визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води на власне сушіння (нагрівання вологого матеріалу та випаровування води) для ступеневих режимів в середньому на 5% нижчі за рахунок зменшення теплових потоків і тривалості процесу.

Низькотемпературне досушування запобігає небажаним змінам у паренхімних тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин

сировини. Одержані в такий спосіб динні чипси мали природний колір та виражений смак дині, набули легкої ламкості та ніжнього хрустоту, мають високу якість та здатність до збереження.

6. Висновки

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги на підставі ізотерм сорбції одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні тканин дині від вологовмісту і температури в діапазоні $u = (0,076...0,98)$ кг/кг с.м. і $t = (50...80)$ °С, що дозволяє встановити зв'язок між тепловолігнісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу.

Визначено, що експериментально одержана питома теплота випаровування вологи з паренхімних тканин дині перевищує відповідні табличні значення теплоти випаровування вільної води в середньому на 6%, а наприкінці сушіння – до 20%. Під час досліджень в діапазоні вологовмістів тканин дині $(0,37...0,59)$ кг/кг с.м. спостерігався піковий екзотермічний ефект.

На підставі експериментальних досліджень одержана формула для розрахунку, з похибкою не більше 2%, питомої теплоємності паренхімних тканин дині в залежності від двох факторів: відносної вологості в діапазоні

$W = (10...85)\%$ відн. і температури в діапазоні $t = (32,5...87,5)$ °С.

За експериментально визначеними питомими теплоємністю дині та витратами теплоти на випаровування з неї вологи на підставі даних з кінетики сушіння розраховані критерії оптимізації процесу R_b та густина теплових потоків для різних температурних режимів, які можна використовувати при розрахунках сушильних установок.

На підставі проведених комплексних досліджень розроблений двоступеневий режим сушіння дині на чипси за температур сушильного агента 80/60 °С. Використання високої температури на першій стадії сушіння позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість. Зниження температури сушильного агента до 60 °С, після досягнення матеріалом температури 50 °С, запобігає небажаним змінам у паренхімних тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин.

Рекомендований режим сушіння дині дозволяє одержати сушений продукт високої якості. Одержані чипси мають природний колір та виражений смак дині, хрустку структуру завдяки дрібно закристалізованим цукрам.

Список літератури:

1. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Дмитренко Н.В., Гусарова О.В. Шляхи раціонального використання рослинної сільськогосподарської продукції. *Кол. монографія: Екологоорієнтовані підходи відновлення техногеннозабруднених територій і створення сталих екосистем* / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава: ПП «Астроя», 2022. С. 394–406.
2. Пузік Л.М. Залежність хімічного складу плодів дині від особливостей сорту. *Овочівництво і багтанництво*. 2010. Вип. 56. С. 267–275. ISSN 0131-0062.
3. Dishri M., Thakur N. Melon. In *Nutraceuticals from Fruit and Vegetable Waste* (eds V. Tomer, N. Chhikara, A. Kumar and A. Panghal). 2024. <https://doi.org/10.1002/9781119803980.ch14>.
4. Ronald M. Marsiglia, Santander E. Lastra-Ripolla, Luis D. Miele-Gómez, Luis A. García-Zapateiro. Physicochemical and Rheological Characterization of Melon Pulp (Cucumis melo) Cultivated in the North of Bolívar Department, Colombia. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 185–190. ISSN: 2088-5334. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.1.7620>.
5. Дмитренко Н., Шапар Р. Конвективне сушіння цукровмісних паренхімних тканин дині. *Scientific Works*. 2021. Vol 85. No 1. С. 75–81. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2073>.
6. Kolayli S., Kara M., Tezcan F., Erim F. B., Sahin H., Ulusoy E., Aliyazicioglu R. Comparative Study of Chemical and Biochemical Properties of Different Melon Cultivars: Standard, Hybrid, and Grafted Melons. *J. Agric. Food Chem.* 2010. 58. P. 9764–9769. <https://doi.org/10.1021/jf102408y>.
7. Rakhmatov O., Rakhmatov F. O. Experimental study of the process of drying melon slices in a chamber-convection dryer. *E3S Web of Conferences*. 2023. 443. 02004. P. 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344302004>.
8. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Обґрунтування режимів сушіння дині. *Енергоефективність процесів сушіння: Тематичний збірник статей* / за ред. Ю.Ф. Снежкіна, Р.О. Шапаря. Київ: Тропеа, 2021. Т.1. С. 43–47.
9. Aktas M., Sevik S., Amini A., Khanlari A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Solar Energy*. 2016. Vol. 137. P. 500–515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>.
10. Hajimirza S., Sharifi A. Effect of two-step drying and ultrasound pretreatment on physicochemical properties of cantaloupe slices. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 2022. Vol.18. Issue 119. P. 183–192. <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-44405-en.html>.
11. Fernandes da Silva J.H., da Silva Neto J.S., Souza da Silva E., de Souza Cavalcanti D.E., Azoubel P.M., Benachour M. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Melon Drying and Computational Fluid Dynamic Modelling of Thermal Profile. *Food Technology and Biotechnology*. 2020. 58 (4). P. 1–23. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.04.20.6813>.
12. Valdiviezo-Seminario C.S., Sánchez-Chero M.J., Flores-Mendoza L.C. Effect of osmotic dehydration pretreatment on melon (cucumis melo) dry-

ing time. *Current Research in Nutrition and Food Science*. 2024, Vol. 12. No. (3). P. 1421–1432. <https://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.12.3.34>.

13. Fernandes F.A.N., Gallao M. I., Rodrigues S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *F.A.N. Fernandes et al. LWT* 2008. Vol. 41. P. 604–610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007>

14. Дабіжа Н.О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України*. 2013. 208 с.

15. Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, Surface Area and Porosity. 2nd ed., London; New York: *Academic Press*, 1982. 303 p. ISBN: 0123009561. ISBN: 9780123009562.

16. Дмитренко Н.В. Вплив стану води на теплофізичні властивості та процес сушіння рослинної сировини: дис...канд. техн. наук 05.14.06. *ІТТФ НАН України*. Київ. 2016. 184 с.

17. Гусарова О.В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук: дис...канд. техн. наук.: 05.14.06. Київ: *ІТТФ НАН України*. 2020. 241 с.

18. Дмитренко Н., Іванов С., Дабіжа Н. Теплофізичні властивості насіння дині та тепломасообмін в процесі його сушіння. *Scientific Works*. 2024. 88 (1). с. 11–18. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2954>.

19. Загоруйко В. А., Голяков О. А., Слинько О. Г. Термодинаміка та теплофізика вологих матеріалів. Київ: *Наукова думка*, 1995. 296 с. ISBN 5-12-004682-7.

20. Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф., Корінчевська Т.В., Горніков Ю.І. Вплив режиму конвективного сушіння на кристалічність порошків з яблук та цукрового буряку. *Промислова теплотехніка*. 2015. Т. 37. № 5. С. 23–37.

21. Lichtenthaler F.W., Pokinskyj P., Immel S. Saccharose als nachwachsender organischer Rohstoff: Neue, selektive Einstiegsreaktionen via Computersimulation ihrer Lösungskonformationen und der Reaktivität ihrer Hydroxylgruppen. *Zuckerind.* 1996. V. 121. Nr. 3. S. 174–190.

22. Дмитренко Н.В., Іванов С.О. Вплив температури та зневоднювання на питому теплоємність паренхімних тканин дині. *Матеріали конференції МЦНД*, (22.11.2024; Біла Церква, Україна). 2024. С. 273–276. <https://doi.org/10.62731/mcnd-22.11.2024.001>

23. Mikhailik V.A., Dmitrenko N.V., Snezhkin Y.F. Change in the Specific Heat Capacity of Parenchymal Tissues of Apples due to Dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. V. 87. N. 1. P. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>

24. Wach W. Fructose // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley, 2004. DOI: https://doi.org/10.1002/14356007.a12_047.pub.2. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/14356007.a12_047.pub2 (дата звернення 18.08.2025).

25. Schenck F. W. Glucose and Glucose-Containing Syrups // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/14356007>.

a12_457.pub.2. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a12_047 (дата звернення 18.08.2025). Назва з екрану.

26. Tombari E., Salvetti G., Ferrari C., Johari G. P. Kinetics and Thermodynamics of Sucrose Hydrolysis from Real-Time Enthalpy and Heat Capacity Measurements. *Journal of Physical Chemistry B*. 2007. Vol. 111. Iss. 3. p. 496–501. <https://doi.org/10.1021/jp067061p>

27. Дмитренко Н. В., Дабіжа Н. О., Гусарова О. В., Малащук Н. С., Гусаров В. М. Тепломасообмін в процесі сушіння дині до низького залишкового вологовмісту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75). № 3. Частина 1. С. 297–306. ISSN 2663-5941 (Print). ISSN 2663-595X (Online).

28. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. *Київ: Сік Груп Україна*, 2018. 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.

29. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Гусарова О.В., Малащук Н.С. Статика, кінетика та енергоефективність процесу сушіння бананів до низької залишкової вологості. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2025. Том 47. № 3. С. 7–19. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.1>

References:

1. Sniezshkin Yu.F., Shapar R.O., Dmytrenko N.V., Husarova O.V. (2022). Shliakhy ratsionalnoho vykorystannia roslynnoi silskohospodarskoi produktsii [Ways of rational use of plant agricultural products]. *Kol. monohrafiia: Ekolohoorientovani pidkhody vidnovlennia tekhnohennozabrudnennykh terytorii i stvorennia stalykh ekosystem* [Collective monograph: Environmentally oriented approaches to the restoration of technologically polluted areas and the creation of sustainable ecosystems] / za zah. red. T. O. Chaiky. Poltava: PP «Astraia». P. 394–406 (in Ukrainian).

2. Puzik L.M. (2010) Zalezhnist khimichnoho skladu plodiv dyni vid osoblyvostei sortu. [The chemical composition of melons depends on the characteristics of the variety]. *Ovochivnytstvo i bashdannnytstvo - Vegetable growing and melon growing*. Vol. 56. p. 267–275. ISSN 0131-0062 (in Ukrainian).

3. Dishri M., Thakur N. (2024) Melon. In *Nutraceuticals from Fruit and Vegetable Waste* / eds. V. Tomer, N. Chhikara, A. Kumar and A. Panghal. <https://doi.org/10.1002/9781119803980.ch14>

4. Ronald M. Marsiglia, Santander E. Lastra-Ripolla, Luis D. Mielles-Gómez, Luis A. García-Zapateiro (2021). Physicochemical and Rheological Characterization of Melon Pulp (Cucumis melo) Cultivated in the North of Bolívar Department, Colombia. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. Vol. 11. No. 1. P. 185–190. ISSN: 2088-5334. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.1.7620>

5. Dmytrenko N., Shapar R. (2021). Konvektyvne sushinnia tsukrovnisnykh parenkhimnykh tkanydyni [Convective drying of sugar-containing parenchyma

tissues of melons]. *Scientific Works*. Vol. 85. No 1. P. 75–81. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2073/> (in Ukrainian).

6. Kolayli S., Kara M., Tezcan F., Erim F. B., Sahin H., Ulusoy E., Aliyazicioglu R. (2010). Comparative Study of Chemical and Biochemical Properties of Different Melon Cultivars: Standard, Hybrid, and Grafted Melons. *J. Agric. Food Chem.* Vol. 58. P. 9764–9769. <https://doi.org/10.1021/jf102408y>

7. Rakhmatov O., Rakhmatov F. O. (2023). Experimental study of the process of drying melon slices in a chamber-convection dryer. *E3S Web of Conferences*. Vol. 443. 02004. P. 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344302004>

8. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2021). Obgruntuvannia rezhymiv sushinnia dyni [Justification of melon drying modes]. *Enerhoefektyvnist protsesiv sushinnia: Tematychnyi zbirnyk statei - Energy efficiency of drying processes: Thematic collection of articles / za red. Yu.F. Sniezhkina, R.O. Shapar*. Kyiv: Tropea. Vol. 1. P. 43–47 (in Ukrainian).

9. Aktas M., Sevik S., Amini A., Khanlari A. (2016). Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. *Solar Energy*. Vol. 137. P. 500–515. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.036>

10. Hajimirza S., Sharifi A. (2022). Effect of two-step drying and ultrasound pretreatment on physicochemical properties of cantaloupe slices. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. Vol. 18. Issue 119. P. 183–192. <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-44405-en.html>

11. Fernandes da Silva J.H., da Silva Neto J.S., Souza da Silva E., de Souza Cavalcanti D.E., Azoubel P.M., Benachour M. (2020). Effect of Ultrasonic Pretreatment on Melon Drying and Computational Fluid Dynamic Modelling of Thermal Profile. *Food Technology and Biotechnology*. 58 (4). P. 1–23. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.04.20.6813>

12. Valdiviezo-Seminario C.S., Sánchez-Chero M.J., Flores-Mendoza L.C. (2024). Effect of osmotic dehydration pretreatment on melon (cucumis melo) drying time. *Current Research in Nutrition and Food Science*. Vol. 12. No. (3), P. 1421–1432. <https://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.12.3.34/>

13. Fernandes F.A.N., Gallao M.I., Rodrigués S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *F.A.N. Fernandes et al. LWT*. Vol. 41. P. 604–610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007/>

14. Dabizha N.O. (2013). Intensyfikatsiia protsesu konvektyvnoho sushinnia termolabilnykh materialiv do nyzkoho zalyshkovoho volohovmistu: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.06. [Intensification of the convective drying process of thermolabile materials to low residual moisture content: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences 05.14.06]. Kyiv: ITTF NAN Ukrainy – IET of NAS of Ukraine. 208 p. (in Ukrainian).

15. Gregg S. J., Sing K. S. W. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. 2nd ed., London, New York: Academic Press. 303 p. ISBN: 0123009561. ISBN: 9780123009562.

16. Dmytrenko N.V. (2016). Vplyv stanu vody na teplofizychni vlastyvyosti ta protses sushinnia roslynnoi syrovyny: dys...kand. tekhn. nauk 05.14.06

[The influence of water condition on the thermophysical properties and drying process of plant raw materials: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences 05.14.06]. *ITTF NAN Ukrainy. Kyiv – IET of NAS of Ukraine*. 184 p. (in Ukrainian).

17. Husarova O.V. (2020). Intensyfikatsiia teplomasoperenosu pid chas oderzhannia chypsiv z yabluk: dys...kand. tekhn. nauk.: 05.14.06. [Intensification of heat and mass transfer during the production of apple chips dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences 05.14.06]. *Kyiv: ITTF NAN Ukrainy – IET of NAS of Ukraine*. 241 p. (in Ukrainian).

18. Dmytrenko N., Ivanov S., Dabizha N. (2024). Teplofizychni vlastyvoli nasinnia dyni ta teplomasoobmin v protsesi yoho sushinnia [Thermophysical properties of melon seeds and heat and mass transfer during drying]. *Scientific Works*. 88 (1). p. 11–18. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2954/> (in Ukrainian).

19. Zahoruiko V. A., Holikov O. A., Slynko O. H. (1995). Termodynamika ta teplofizyka volohykh materialiv [Thermodynamics and thermophysics of wet materials]. *Kyiv: Naukova dumka – Kyiv: Naukova Dumka*. 296 p. ISBN 5-12-004682-7 (in Ukrainian).

20. Mykhailyk V.A., Sniezhhin Yu.F., Korinchevska T.V., Hornikov Yu.I. (2015). Vplyv rezhymu konvektyvnoho sushinnia na krystalichnist poroshkiv z yabluk ta tsukrovoho buriaku [Influence of convective drying regime on the crystallinity of apple and sugar beet powders]. *Promyslova teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*. Vol. 37. No 5. P. 23–37 (in Ukrainian).

21. Lichtenthaler F.W., Pokinskyj P., Immel S. (1996). Saccharose als nachwachsender organischer Rohstoff: Neue, selektive Einstiegsreaktionen via Computersimulation ihrer Lösungskonformationen und der Reaktivität ihrer Hydroxylgruppen. *Zuckerind*. Vol. 121. Nr. 3. S. 174–190.

22. Dmytrenko N.V., Ivanov S.O. (2024). Vplyv temperatury ta znevodniuvannia na pytomu teploiennist parenkhimnykh tkanyh dyni [The effect of temperature and dehydration on the specific heat capacity of melon parenchyma tissues]. *Materialy konferentsii MTsND – Conference proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, (22.11.2024; Bila Tserkva, Ukraine). p. 273–276. <https://doi.org/10.62731/mcnd-22.11.2024.001> (in Ukrainian).

23. Mikhailik V.A., Dmytrenko N.V., Snezhkin Y.F. (2014). Change in the Specific Heat Capacity of Parenchymal Tissues of Apples due to Dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. V. 87. N. 1. P. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>

24. Wach W. Fructose (2004). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley, 2004. DOI: https://doi.org/10.1002/14356007.a12_047.pub.2

25. Schenck F. W. Glucose and Glucose-Containing Syrups (2006). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley. DOI: https://doi.org/10.1002/14356007.a12_457.pub.2

26. Tombari E., Salvetti G., Ferrari C., Johari G. P. (2007). Kinetics and Thermodynamics of Sucrose Hydrolysis from Real-Time Enthalpy and Heat Capacity Measurements. *Journal of Physical Chemistry B*. Vol. 111. Iss. 3. P. 496–501. <https://doi.org/10.1021/jp067061p>

27. Dmytrenko N. V., Dabizha N. O., Husarova O. V., Malashchuk N. S., Husarov V. M. (2025). Teplomasoobmin v protsesi sushinnia dyni do nyzkoho zalyshkovoho volohovmistu [Heat and mass transfer in the process of drying melons to low residual moisture content]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*. Vol. 36 (75). No. 3. Chapter 1. P. 297–306. ISSN 2663-5941 (Print). ISSN 2663-595X (Online) (in Ukrainian).

28. Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O. (2018). Teplomasoobminni tekhnolohiyi pererobky pektynovmisnoyi syrovyny [Heat-mass exchange technologies for pectin-containing raw materials processing]. *TOV «Sik hrup Ukrayina» – Sik Hrup Ukraine*. 228 p. ISBN 978–617–7457–69–4 (in Ukrainian).

29. Sniezhkin Yu.F., Dabizha N.O., Husarova O.V., Malashchuk N.S. (2025). Statyka, kinetyka ta enerhoefektyvnist protsesu sushinnia bananiv do nyzkoi zalyshkovoi volohosti [Statics, kinetics and energy efficiency of the process of drying bananas to low residual moisture content]. *Teplofizyka ta teploenerhetyka – Thermophysics and thermal energy*. Vol. 47. No 3. P. 7–19. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.1> (in Ukrainian).