

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.8.047

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/39>

Дмитренко Н.В.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Дабіжа Н.О.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусарова О.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Малащук Н.С.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусаров В.М.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ДИНІ ДО НИЗЬКОГО ЗАЛИШКОВОГО ВОЛОГОВМІСТУ

Стаття присвячена дослідженню тепломасообміну в процесі сушіння дині до низького залишкового вологовмісту. Зважаючи на нетривалий термін зберігання свіжої дині та необхідність утилізації відходів, сушіння є ефективним методом переробки. Наявність термолабільних речовин у складі дині, обмежує інтенсифікацію сушіння шляхом підвищення температури, а довготривалий тепловий вплив викликає руйнування вітамінів, карамелізацію цукрів і утворення меланоїдів.

Метою статті є визначення закономірностей тепломасообміну під час зневоднення дині для розроблення режимів конвективного сушіння до низької залишкової вологості, які забезпечать мінімізацію енерговитрат, збереження природного складу дині та високу якість продукту (чипсів).

Було визначено сорбційні та теплофізичні властивості паренхімних тканин дині. Встановлено, що витрати енергії на десорбцію зв'язаної води зростають зі зменшенням вологовмісту. Виявлено піковий екзотермічний ефект в діапазоні вологовмістів 0,37...0,59 кг/кг с.м., який, ймовірно, пов'язаний з кристалізацією цукрів дині. Саме вміст цукрів пояснює хрустку структуру чипсів, підвищення їхніх смакових якостей і терміну зберігання.

За даними з кінетики сушіння паренхімних тканин дині розраховані оптимізаційний критерій Ребіндера та теплові потоки на поверхні матеріалу. Показано, що на початку процесу сушіння значна частина енергії витрачається на нагрівання матеріалу, а його різке зростання при вологовмісті 2,60 кг/кг с.м. вказує на доцільність зниження температури сушильного агента для раціонального використання теплоти та збереження якості продукту.

На підставі проведених комплексних досліджень запропоновано двостадійний режим сушіння дині при 80/60 °С. Використання високої температури 80 °С на першій стадії, інтенсифікує процес зневоднення, а її зниження до 60 °С на другій стадії, після досягнення матеріалом температури 50 °С, запобігає небажаним змінам у тканинах дині та руйнуванню термолабільних речовин. Розроблений режим дозволяє одержати динні чипси з природним кольором та смаком, легкою ламкістю та ніжним хрускотом.

Ключові слова: диня, чипси, теплофізичні, сорбційні властивості, конвективне сушіння, критерій Ребіндера, енергоефективність.

Постановка проблеми. В окремих регіонах України склались сприятливі умови для вирощування дині, однак, через короткий термін зберігання врожай потребує швидкої реалізації чи перероблення на продукти з подовженим терміном зберігання. Додатково виникає проблема утилізації м'якоті, яка залишається після вилучення насіння для відновлення посівного фонду.

Найпоширенішою технологією перероблення та збереження рослинної сировини є сушіння, але якість кінцевого продукту залежить від температури та швидкості процесу. Недотримання параметрів ведення процесу може призвести до небажаних фізико-хімічних змін, деформації тканин, активації небажаних ферментативних процесів або мікробного розмноження, що погіршує смакові та органолептичні властивості.

Враховуючи, що сушіння є енерговитратним процесом, актуальними залишаються дослідження зневоднення сировини з метою підвищення енергоефективності та забезпечення отримання продукту високої якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характеристика дині як об'єкту сушіння.

Диня є термолабільним колоїдним капілярно-пористим матеріалом, що складається з різних за своєю структурою і складом частин. Плоди мають шкірку, ніжну соковиту м'якоть та насінневе гніздо з насінням у жорсткій оболонці.

М'якоть дині залежно від сорту має різні кольори та щільність, багата на різні цінні речовини, які наведено на рисунку 1. Цукри в дині представлені (у % до загальної кількості цукрів): 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 (А, В₁, В₂, С, РР).

Завдяки високому вмісту фолієвої кислоти та заліза диня сприяє профілактиці атеросклерозу, підтримує кровотворення та нормалізує перебіг окислювальних процесів [1–6].

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 та штучним шляхом з отриманням продуктів із проміжною вологістю (15...30% – в'ялена диня, сухофрукти) та низькою вологістю (5...8% – чипси).

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.

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

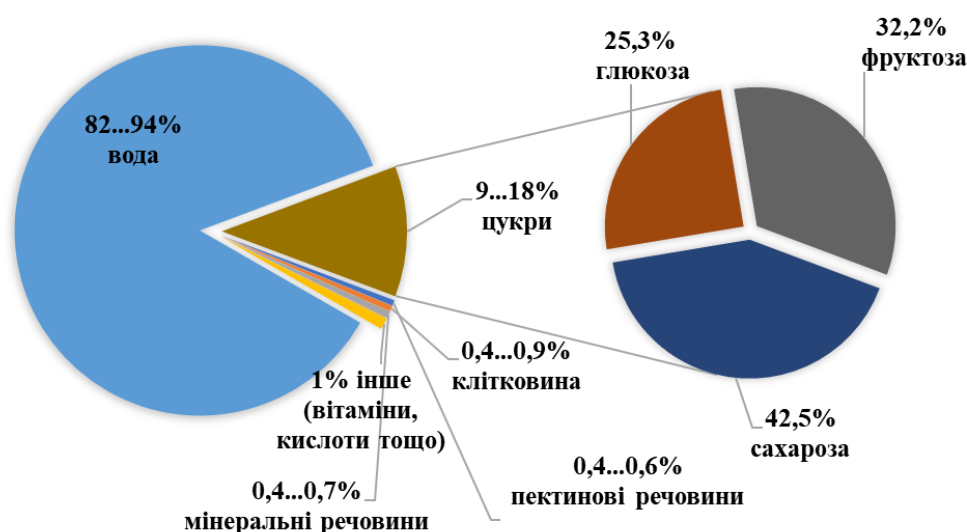


Рис. 1. Середній хімічний склад дині, % на сирому масу

Джерело: узагальнення даних [1–6]

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

У дослідженні [9] визначений вплив температури, швидкості сушильного агента та попередньої обробки сировини бланшуванням і осмотичною дегідратацією на ефективність випаровування вологи та збереження вітамінів під час зневоднення дині в інфрачервоній сушарці з рекуперацією сонячної теплоти. Оптимальний температурний режим, при якому не відбувається потемніння сировини та втрати біологічно-активних речовин, становить 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 температури від 50 до 80 °С. 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 несприятливими погодними умовами,

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 оптимізаційний критерій Ребіндера та теплові потоки на поверхні матеріалу в процесі сушіння. Результати таких досліджень є основою для розроблення енергоефективних режимів зневоднення і використовуються при проектуванні та оптимізації сушильних установок.

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

Матеріали та методи. Для дослідження особливостей зневоднення м'якоті дині використовували сорт «Ананас». Перед дослідом 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 вологи в зразках визначали як відношення маси вологи до маси вологого матеріалу – відносна вологість W (%), або як відношення маси вологи до маси абсолютно сухого матеріалу – вологовміст u (кг/кг с.м.). Початкова відносна вологість м'якоті дині у свіжому стані визначалася за ДСТУ 7804:2015 і варіювалась в межах 92,9...94,1 %.

Дослідження гіротермічного рівноважного стану дині 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.

За ізотермами сорбції, використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона, визначається чиста теплота адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням (1) [14]:

$$q_a = \left[\ln \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] R. \quad (1)$$

Дослідження основних закономірностей тепло- і масообміну процесу конвективного сушіння дині проводилися на експериментальному 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 під час зневоднення [15]. Дослідження проводилися за таких режимних параметрів процесу: температура сушильного агента $t_c - 60$ і 80 °C; швидкість сушильного агента $v - 2$ м/с; вологовміст сушильного агента $d - 13$ г/кг с.п.; початкове питома навантаження матеріалу $- 5,3$ кг/м². За експериментальними даними з кінетики сушіння паренхімних тканин дині одержані криві $u = f(t)$, $t = f(\tau)$, $du/d\tau = f(u)$, $t = f(u)$.

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, 16].

Зв'язок між теплообміном і вологообміном встановлюється за основним рівнянням кінетики процесу сушіння (2):

$$q^*(\tau) = \frac{q(\tau)}{q_N} = \left(\frac{du}{d\tau} \right)^* (1 + Rb), \quad (2)$$

де $q^*(\tau)$ – відносна густина теплового потоку; $q(\tau)$ – потік тепла в періоді падаючої швидкості сушіння, кВт/м²; q_N – потік тепла 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 Ребіндера, який характеризує співвідношення кількості теплоти, яка витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, яка витрачена на випаровування з нього вологи, за нескінченно малий проміжок часу.

Число Ребіндера розраховується за формулою (3):

$$Rb = \frac{c}{r} \left(\frac{dt}{du} \right), \quad (3)$$

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

Змінювання густини теплового потоку $q(\tau)$ на поверхні матеріалу впродовж процесу сушіння, визначається за залежністю (4), кВт/м²:

$$q(\tau) = q^*(\tau) \cdot q_N, \quad (4)$$

де q_N – густина теплового потоку в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, визначається за (5):

$$q_N = r_N \frac{m_{a.c.}}{S} \left(\frac{du}{d\tau} \right)_N, \quad (5)$$

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

Виклад основного матеріалу.

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 °C

в діапазоні відносних тисків 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-пористим 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 при виробництві 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 [14], за одержаною при $t = 20^\circ\text{C}$ ізотермою сорбції визначили максимальний гігроскопічний вологовміст паренхімних тканин дині $u_{os} = 0,985$ кг/кг с.м. та розраховували значення рівноважних вологовмістів в діапазоні температур від 50 до 80 $^\circ\text{C}$. Слід зазначити, що ізотерми сорбції відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води). 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. стає сумірним з тиском пари води в навколишньому середовищі p_c .

З ізотерм сорбції за різних температур за рівнянням (1) 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 .

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 на десорбцію адсорбційно-зв'язаної води q при досягненні матеріалом вологовмісту 0,06 кг/кг с.м. збільшуються на 13% в порівнянні з теплою випаровування вільної води r .

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.

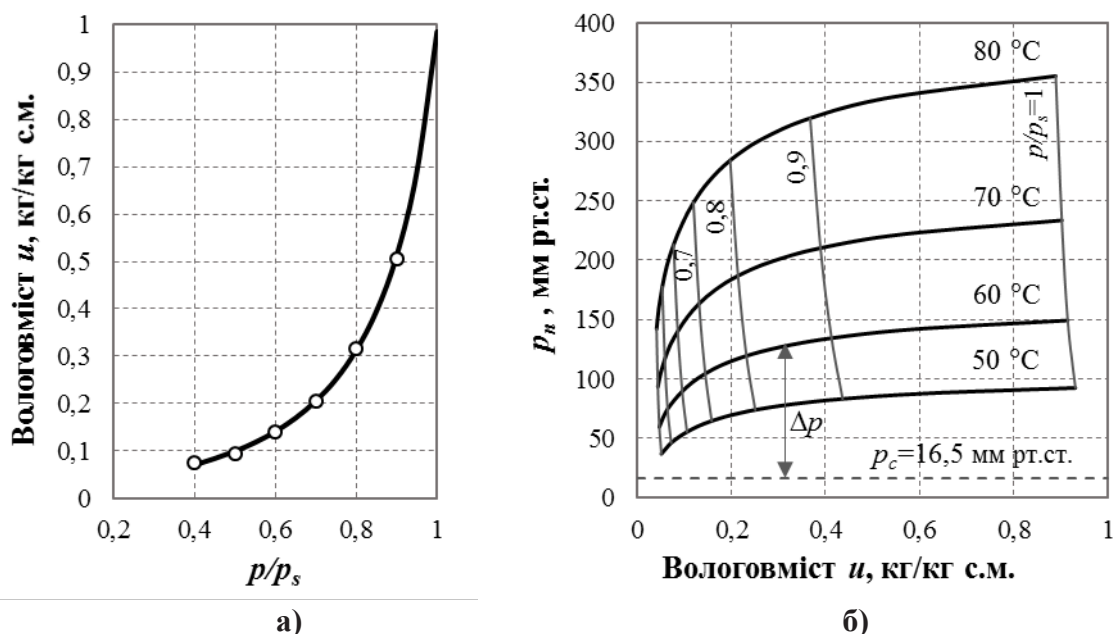


Рис. 2. Ізотерма адсорбції пари води паренхімними тканинами дині за температури 20 $^\circ\text{C}$ (а) та залежність парціального тиску пари води на поверхні дині від вологовмісту і температури (б)

Джерело: власні дослідження

Результати досліджень витрат теплоти на випаровування води з тканин дині в процесі сушіння опубліковані в працях [1, 5]. Як видно з наведених на рис. 3б залежностей, 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).

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 [1, 5] визваний процесом кристалізації цукрів дині.

Результати експериментальних досліджень теплоємності паренхімних тканин дині в залежності від температури та ступеня їх зневоднення викладені в праці [17]. Аналіз одержаних залежностей виявив злам лінійності при досягненні матеріалом вологості $W \approx 10\%$ відн., що обумовлено деградацією спіральної структури білків при втрачання воді, та піки плавлення, що є свідченням процесу кристалізації цукрів в паренхімних тканинах дині під час зневоднення. За експериментальними даними для розрахунку питомої теплоємності паренхімних тканин дині в діапазоні вологості $W = 10...85\%$ відн. за температури

$t = 32,5...87,5$ °С шляхом лінійної апроксимації отримана формула (6), кДж/кг·К:

$$c_p(W, t) = 1,2917 + 0,0266W + 0,0094t - 0,00008Wt \quad (6)$$

2. Дослідження процесу конвективного сушіння паренхімних тканин дині

Результати дослідження процесу конвективного сушіння паренхімних тканин дині 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. Так за температури сушильного агента 60 °С тривалість процесу склала близько 205 хв. (рис. 4а), а при підвищенні до 80 °С – зменшилась до 105 хв., тобто майже у 2 рази. Швидкість сушіння du/dt (рис. 4б) в початковий 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 $u_{кр}$. І другий – період температури $t = var$, яка підвищується з часом, наближуючись до температури сушильного агента. Тривалість першого періоду – приблизно

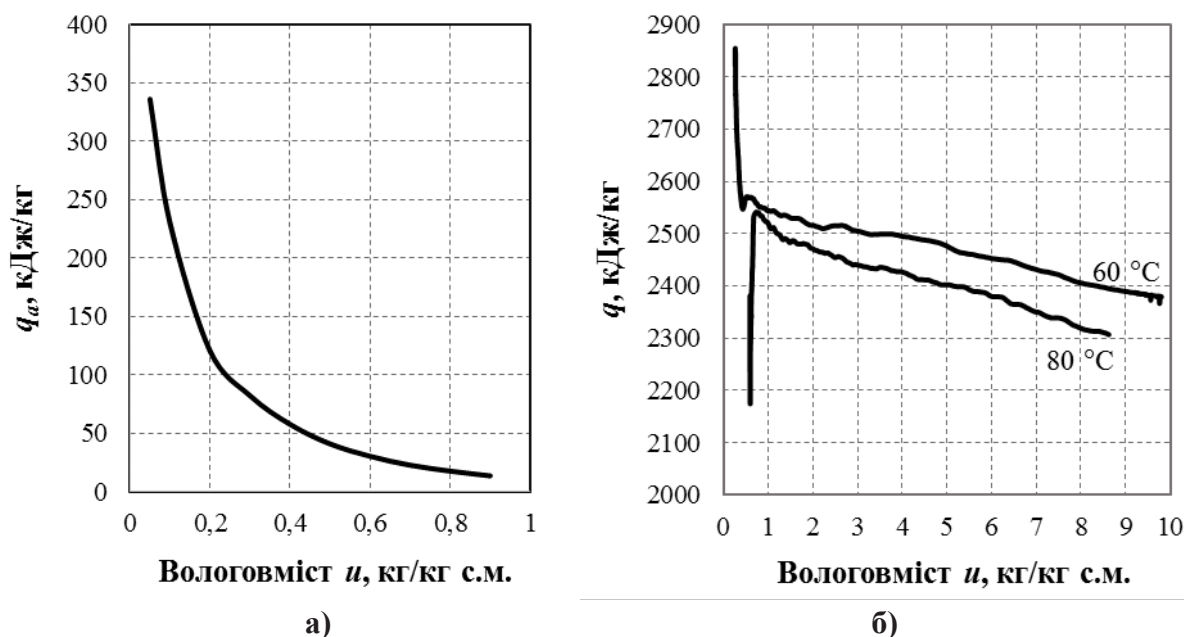


Рис. 3. Чиста ізостерична теплота адсорбції (а) та питомі витрат теплоти на сушіння (б) паренхімних тканин дині

Джерело: власні дослідження

10 хв., $u_{кр}$ становить 10,85 та 10,46 кг/кг с.м., відповідно, за температур сушильного агента 60 і 80 °C.

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 знижується (рис. 4б). 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 $t = 80$ °C і 0,93 кг/кг с.м. за $t = 60$ °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 вміст таких цукрів пояснює хрустку структуру чипсів, підвищення їхніх смакових якостей та терміну зберігання.

3. Дослідження тепломасообміну процесу сушіння дині до низького залишкового вологовмісту

Для оптимізації інтенсивності теплопідведення в процесі сушіння паренхімних тканин дині за встановленою залежністю $t = f(u)$ (рис. 4б), а також за експериментально визначеними питомими теплоємністю дині (формула (6)) та витратами теплоти на випаровування з неї води (рис. 3б) за формулою (3) розраховано змінювання критерію Ребіндера Rb для різних температурних режимів (рис. 5а). За цими даними за формулою (4) розраховане змінювання густини теплового потоку за різних температура теплоносія в залежності від вологовмісту (рис. 5б). Теплові потоки визначали за експериментально одержаними теплофізичними характеристиками (теплоємністю та теплою випаровування), що дозволило, крім теплоти пароутворення, врахувати реальні витрати теплоти в процесі сушіння дині, а саме: теплоту руйнування зв'язків молекул води з іншими речовинами рослинної тканини і теплоту адсорбції пари води матеріалом. За одержаними величинами теплових потоків можна розрахувати

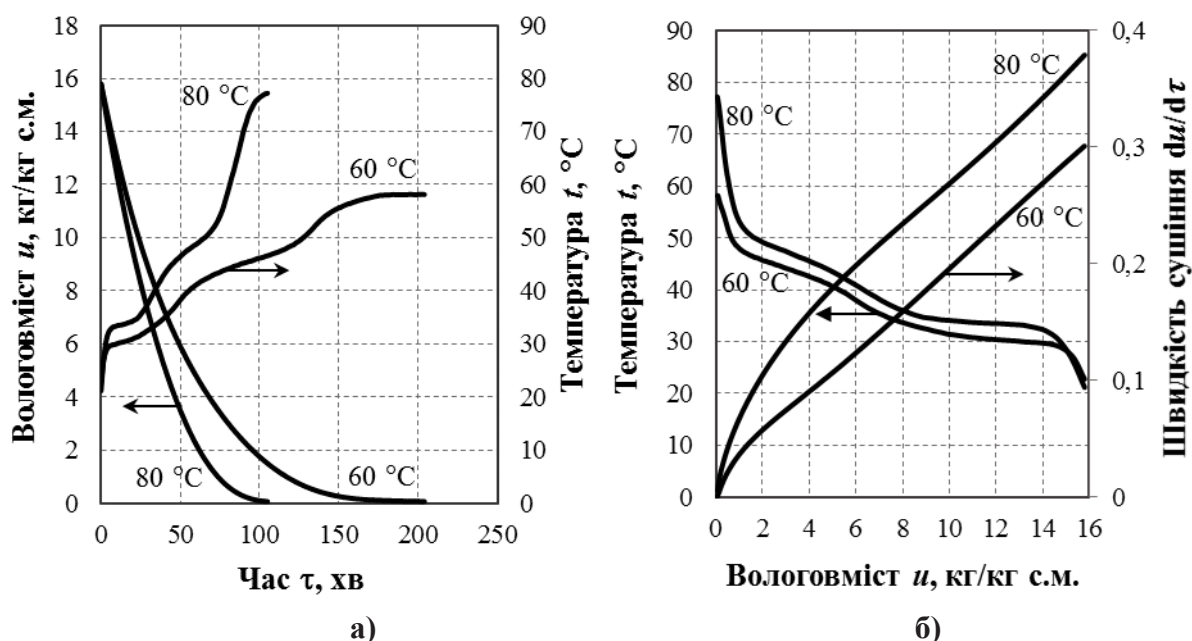


Рис. 4. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння паренхімних тканин дині (режимні параметри $v = 2$ м/с; $d = 13$ г/кг с.п., $\delta = 5$ мм)

Джерело: власні дослідження

витрати теплоти в сушарці, які необхідні на нагрівання матеріалу та його зневоднення.

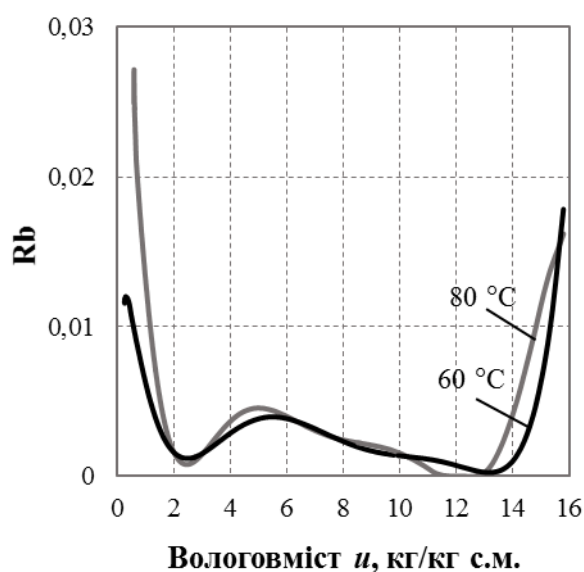
Оскільки нагрівання матеріалу за своєю сутністю є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини R_b до мінімально можливого значення. Як видно з рис. 5а, на початку процесу сушіння, що відповідає періоду прогрівання матеріалу, R_b має досить великі значення. У процесі сушіння R_b 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 R_b різко зростає, відбувається нагрівання матеріалу, що при температурах сушіння вищих за 60 °С призводить до погіршення органолептичних показників висушеної дині. З цього моменту доцільно знижувати температуру сушильного агента не лише для більш раціонального використання енергії, але й для позитивного впливу на якість готового продукту.

На графіках (рис. 5б) бачимо, що зі зниженням вологовмісту паренхімних тканин дині теплові потоки на поверхні зменшуються і, можливо зменшити підведення енергії до сушильної камери задля більш раціонального її використання.

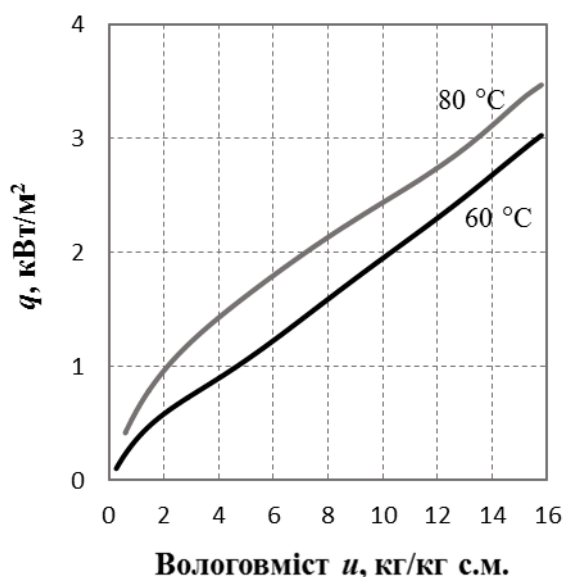
Проведені комплексні дослідження дозволяють розробити енергоефективну технологію сушіння дині до низького залишкового вологовмісту для одержання чипсів високої якості,

особливістю якої є проведення процесу зневоднення за багатоступеневим 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. 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 $\Delta p = p_m - p_c$. Тому під час досушування за температури 60 °С необхідно враховувати цей фактор.

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 ніжного хрустоту, мають високу якість та здатність до збереження.



а)



б)

Рис. 5. Число R_b (а) та густина теплового потоку (б) в залежності від відносної вологості паренхімних тканин дині в процесі їх сушіння за різних температур сушильного агента

Джерело: власні дослідження

Висновки. На підставі проведених комплексних досліджень запропоновано використання двохстадійного режиму сушіння дині на чипси при температурі 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.

За експериментально визначеними питомими теплоємністю дині та витратами теплоти

на випаровування з неї вологи, на підставі даних з кінетики сушіння, розраховано змінювання критерію Ребіндера Rb для різних температурних режимів. Характер кривих $Rb = f(u)$ доводить доцільність та ефективність використання стадійних режимів сушіння. Отримані висновки калориметричних експериментів добре співпали з результатами конвективного сушіння паренхімних тканин дині.

Рекомендований двохстадійний режим сушіння дині дозволяє отримати 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. <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. Шапарь. 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) drying 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. Fabiano A.N. Fernandes, Maria Izabel Gallao, Sueli Rodrigues. 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. 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.
16. 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>
17. Дмитренко Н.В., Іванов С.О. Вплив температури та зневоднювання на питому теплоємність паренхімних тканин дині. *Матеріали конференцій МЦНД*, (22.11.2024; Біла Церква, Україна). 2024. С. 273–276. <https://doi.org/10.62731/mcnd-22.11.2024.001>

Dmytrenko N.V., Dabizha N.O., Husarova O.V., Malashchuk N.S., Husarov V.M.

HEAT AND MASS TRANSFER OF MELON DRYING TO A LOW RESIDUAL MOISTURE CONTENT

The article is devoted to the study of heat and mass transfer in the process of drying melon to a low residual moisture content. Taking into account the short shelf life of fresh melon and the need for waste disposal, drying is an effective method of processing. The presence of thermolabile substances in the composition limits the intensification of drying by increasing the temperature, and prolonged thermal exposure causes the destruction of vitamins, caramelisation of sugars and the formation of melanoids.

The purpose of the article is to determine the regularities of heat and mass transfer during melon dehydration for the development of convective drying regimes to low residual moisture. The modes should ensure minimisation of energy consumption, as well as preservation of the natural composition of melon and high product quality.

The sorption and thermophysical properties of the parenchymal tissues of the melon were determined. It was found that the energy consumption for the desorption of bound moisture increases with decreasing moisture content. A peak exothermic effect in the range of moisture contents of 0.37...0.59 kg/kg dry basic was found, which is probably associated with the crystallisation of melon sugars. It is the sugar content that explains the crispy structure of the crisps, their improved taste and shelf life.

The calculation of the Rebinder criterion (Rb) showed that at the beginning of the drying process, a significant part of the energy is spent on heating the material, and its sharp increase at a moisture content of 2.60 kg/kg dry basic indicates the expediency of reducing the temperature of the drying agent for the rational use of energy and preservation of product quality.

On the basis of comprehensive studies, a two-stage melon drying regime of 80/60 °C was proposed. The use of a high temperature of 80 °C at the first stage intensifies the dehydration process, and its reduction to 60 °C at the second stage, after the material reaches a temperature of 50 °C, prevents undesirable changes in melon tissue and the destruction of thermolabile substances. The developed mode allows to produce melon chips with natural colour and taste, light brittleness and delicate crunch.

Key words: melon, chips, thermophysical, sorption properties, convective drying, Rebinder criterion, energy efficiency.