

THEORETICAL ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF PROCESSING BLUEBERRY BERRIES BY KNOWN DRYING METHODS

Zh. Petrova, K. Slobodianiuk, O. Grakov

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Key words:

Drying
Blueberry
Infrared radiation
Convection
Vacuum
Sublimation

Article history:

Received 11.05.2022
Received in revised form
25.05.2022
Accepted 13.06.2022

Corresponding author:

K. Slobodianiuk

E-mail:

slobod_katya@ukr.net

ABSTRACT

Over the past 20 years, the volume of trade in berries has increased 9 times and the latter has become a product of mass consumption. Ukraine's berry industry is one of the most dynamic in terms of export growth in the agricultural sector. Over the past few years, Ukraine has become one of the largest European producers of blueberries. Blueberries have a short shelf life. This problem is mostly solved by the fact that blueberries are frozen and in this state the export of frozen berry products to the European Union is more active.

Drying of colloidal capillary-porous materials (berries, fruits and vegetables) is one of the most common methods of processing because it reduces the activity of water and microbiological transformations in the product, reduces weight and volume, and minimizes physical and chemical losses during storage. Drying processes are one of the most energy-intensive technological processes and, given the high cost of energy resources, significantly affect the economic performance of production.

The aim of the article was to analyze the current state of production and processing of blueberries in Ukraine and the world, as well as based on existing data to analyze the specific energy consumption of known drying methods.

Theoretical analysis of existing research on the processing of blueberries into dried products showed that foreign researchers in most cases prefer more energy-intensive drying methods: vacuum, freeze-drying and their combination with each other and with classical convective drying. Infrared drying is employed as a pre-treatment and is not recommended as a classic method of drying blueberries, as it causes deterioration of the final product. All studies, especially the preliminary stage, were carried out in the laboratory and have not been tested on industrial equipment. Thus, the question arises to develop efficient preparation and energy-efficient heat technology for drying blueberries on an industrial scale.

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕРОБКИ ЯГІД ЛОХИНИ ВІДОМИМИ МЕТОДАМИ СУШІННЯ

Ж. О. Петрова, К. С. Слободянюк, О. П. Граков

Інститут технічної теплофізики НАН України

За останні 20 років обсяги торгівлі ягодами, які перетворилися на продукт масового споживання, зросли у 9 разів. Ягідна галузь України є однією з найбільш динамічних за рівнем зростання експорту в аграрному секторі. За кілька останніх років Україна стала одним з найбільших європейських виробників лохини. Ягоди лохини мають короткий термін зберігання, тому їх заморозжують. У такому стані більш активно відбувається експорт замороженої ягідної продукції до країн Євросоюзу.

Сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів (ягід, фруктів та овочів) — один із найбільш поширених способів переробки, оскільки знижує активність води та мікробіологічних перетворень у продукті, зменшує вагу та об'єм, а також мінімізує фізико-хімічні втрати корисних речовин при зберіганні. Сушильні процеси є одними з найбільш енергоємних технологічних процесів і, враховуючи високу вартість енергоресурсів, значною мірою впливають на економічні показники виробництва.

У статті проаналізовано сучасний стан вирощування і переробки ягід лохини в Україні та світі, а також на основі існуючих даних виконано аналіз питомого енергоспоживання відомих методів сушіння.

Теоретичний аналіз існуючих досліджень, присвячених переробці ягід лохини на сушену продукцію, показав, що зарубіжні дослідники у більшості випадків надають перевагу більш енергоємним методам сушіння: вакуумному, сублімаційному та їх комбінуванню між собою і з класичним конвективним сушінням. Інфрачервоне сушіння застосовується як попередня підготовка і не рекомендується як класичний метод сушіння ягід лохини, оскільки викликає погіршення якості кінцевого продукту переробки. Всі дослідження, особливо етап попередньої підготовки, реалізовані в лабораторних умовах і не були апробовані на промисловому обладнанні. Отже, постає питання ефективної підготовки та розробки енергоефективної теплотехнології сушіння ягід лохини в промислових масштабах.

Ключові слова: *сушіння, лохина, інфрачервоне випромінювання, конвекція, вакуум, сублімація.*

Постановка проблеми. Обсяги торгівлі кісточковими фруктами у світі, починаючи з 2001 р., зросли у 4 рази, зерняткових фруктів — у 3 рази, ягід — у 9 разів (Кухтіна, 2020). За цей період ягоди перетворилися на продукт масового споживання (Галат, 2021).

Ягідна галузь України — одна з найбільш динамічних в аграрному секторі і за рівнем зростання експорту. З кожним роком валове виробництво та урожайність ягідних культур в Україні зростає, динаміка приросту представлена на рис. 1. За даними Державної служби статистики України за період з 2014 р. по 2018 р. експорт свіжих і заморожених ягід зріз приблизно вп'ятеро. Якщо в 2014 р. вітчизняні ягоди компанії експортували за кордон близько 4,5 тонни свіжої продукції на загальну суму понад 7 млн дол. США, то у 2018 р. обсяг становив майже 23,5 тонни, а грошовий еквівалент перевищив позначку 33 млн дол. США (Балан, 2019).

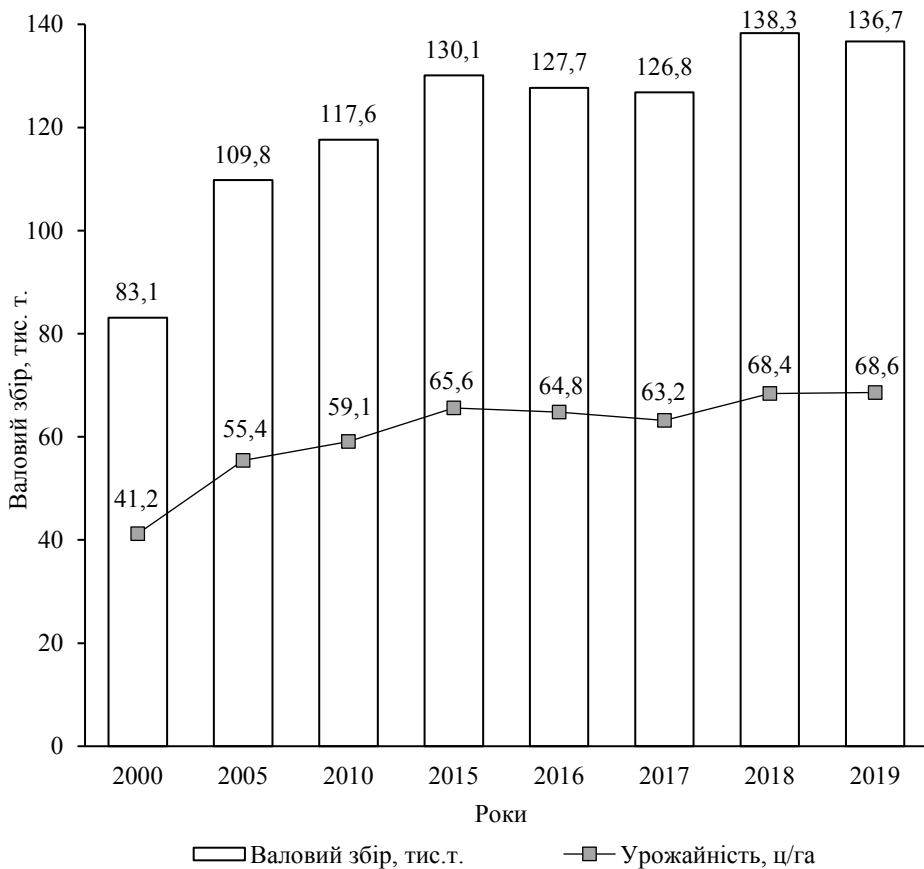


Рис. 1. Валове виробництво та урожайність ягідних культур в Україні за роками

Суттєві зміни відбуваються у вирощуванні лохини. Лохина (*Vaccinium corymbosum* L.) набула популярності серед споживачів через результати досліджень, які пов'язують її споживання з покращенням здоров'я людини (Tamás, 2021). Лохина має високий вміст антиоксидантних з'єднань (флавоноїдів і антоціанів) і вітамінів А, В, С і Е, добре відома своїми протипухлинними, протизапальними та протидіабетичними властивостями (Tamás, 2021).

Інформація про поживну цінність лохини представлена в табл. 1 (Mazza, 2005; Satanina, 2011).

Цукор є основним компонентом лохини, вміст сухих розчинних речовин становить 65%. До хімічного складу лохини входить майже однакова кількість глюкози та фруктози, не містить сахарози. Як і всі фрукти та ягоди, лохина є хорошим джерелом харчових волокон (2,4% свіжої маси). Лохина не дуже багате джерело вітамінів і мінералів, однак свіжа ягода містить досить велику кількість вітаміну С (Satanina, 2011). Високий вміст марганцю (0,34 мг/100 г FW, *USDA Nutrient Database*) робить лохину чудовим джерелом цього мінералу (Satanina, 2011).

Таблиця 1. Поживна цінність лохини

№ п/п	Склад	Вміст, мг/100 г свіжої маси
1	Волога	84,65
2	Білки	0,74
3	Ліпіди	0,42
4	Цукри	9,96
5	Харчові волокна	2,41
6	Пектин	0,60
7	Кислоти	0,51
8	Вітаміни/мінерали	0,12
9	Поліфеноли	0,40
10	Інше	0,29

За кілька останніх років Україна стала одним з найбільших європейських виробників лохини та світовим лідером за темпами зростання площ під її насадженнями (Поперечна, 2020).

За 12 років, з 2007 р. площі комерційних насаджень зросли з 134 га до 2758 га — майже у 20 разів (рис. 2) (Поперечна, 2020).

Серед м'яких ягід, що культивуються в Україні, в останній час лохина високоросла здобула найбільшу прихильність у комерційних товаровиробників та має більші експортні перспективи через низку переваг: зростаючий попит на ягоди лохини на найближчому до України свіжому ринку ягід — ринку ЄС; має комерційні переваги — серед ягід, що культивують в Україні, лохина краще зберігається, більш транспортабельна; насадження лохини високорослої плодоносять 50—60 років; збирання ягід можливе машинним способом; у поточний період ціни на лохину в Україні та і у світі найвищі, як наслідок, висока маржинальність (Галат, 2021).

Однак, попри зростання експорту ягідної продукції, обсяги експорту свіжих ягід в останні роки з України не значні, його географія обмежується переважно країнами сусідами. Головним споживачем більшості товарної продукції, як і раніше, виступає Польща, що скоріше за все свідчить про її подальший перепродаж у треті країни або на подальшу переробку (Галат, 2021).

Ягоди лохини мають короткий термін зберігання, тому лохину заморожують і в такому стані більш активно відбувається експорт замороженої ягідної продукції до країн Євросоюзу: Польщі, Німеччини, Чехії, Литви, Франції, Італії тощо. За цим каналом збуту за п'ять років по більшості країн відбулося зростання у 2—3 рази. Втім у 2019 р. сукупний обсяг експорту ягідної продукції (свіжої і замороженої) склав близько 10% від валового виробництва ягід в Україні (Галат, 2021).

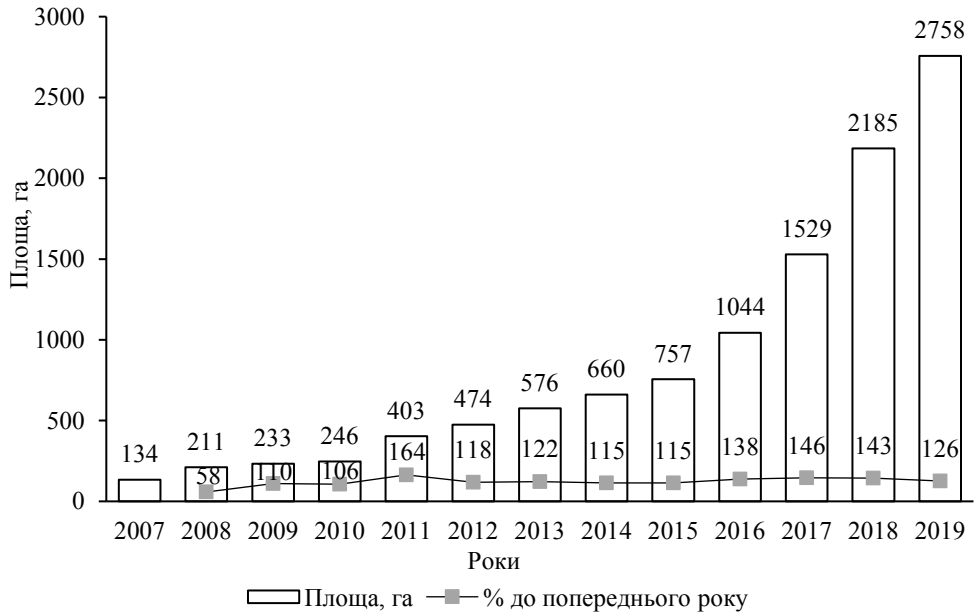


Рис. 2. Динаміка закладання площ лохини садової в Україні за роками

Варто зазначити, що таким ягодам, як ожина, лохина, полуниця, журавлина та малина приділяється велика увага через їх позитивний вплив на здоров'я та профілактику захворювань людей (Brownmiller та ін., 2008; Fracassetti та ін., 2013). Також вчені стверджують, що саме вміст в них поліфенолів, зокрема антоціанів, відповідає за запобігання різних захворювань (Fracassetti та ін., 2013; Routray та ін., 2011).

Антоціани — це природні пігменти в ягодах, саме червоного, синього і фіолетового кольорів, які широко використовуються як барвники в багатьох продуктах харчування (Bridle та ін., 1997).

Відомо, що вміст антоціанів в ягодах значно різниться, наприклад (в г/кг свіжої маси) їх вміст у: лохини — 0,37; ожини — 0,25; журавлини — 0,14; винограду — 0,03; малини — 0,09; полуниці — 0,02 (Wu та ін., 2006). Отже, найвищий вміст антоціанів у ягодах лохини, але під час переробки вони легко руйнуються (Brownmiller та ін., 2008).

Порошок, отриманий у результаті переробки ягід лохини, має широке застосування в харчовій промисловості. Він застосовується в молочних продуктах, дитячому харчуванні, кондитерських виробках та іншій продукції (Fracassetti та ін., 2013). Перевагами такої порошкоподібної продукції є довший термін зберігання, менший об'єм та вага, відповідно, істотно дешевша вартість транспортування (Bhandari та ін., 2013).

Сушіння фруктів та овочів — один з найбільш поширених процесів переробки, оскільки знижує водяну та мікробіологічну активність продукту, зменшує вагу та об'єм, а також мінімізує фізико-хімічні зміни при зберіганні (Погожих та ін., 2015).

Як об'єкт сушіння ягідні культури мають такі особливості:

- високий вміст води, близько 80—90%;
- до складу ягід, окрім води, входить клітинний сік — вода з нерозчиненими в ній поживними та біологічно активними речовинами, вуглеводами, азотистими речовинами, вітамінами, мінеральними солями та ароматичними речовинами;
- невелика частина води (10...15% загальної кількості) утримується міцніше рослинними колоїдами та потребує на видалення значних енерговитрат тощо (Погожих та ін., 2015).

Усі ці фактори обов'язково мають бути враховані при дослідженні сушіння ягід лохини різними методами, оскільки деякі з них можуть суттєво вплинути на загальну тривалість зневоднення й тепломасообмінний процес у цілому. Хімічні властивості та структура ягідних культур потребують ретельного вивчення (Дмитренко, 2018), а матеріал має бути правильно попередньо підготовленим до зневоднення.

В Україні переважає переробка ягід лохини на заморожену продукцію і недостатньо даних наукових досліджень, що стосуються саме кінетики сушіння. В інформаційному просторі переважають рекомендації побутового характеру, тому подальший огляд та аналіз у пропонованій статті стосується зарубіжних джерел.

Метою статті є аналіз сучасного стану вирощування та переробки ягід лохини у світі та питомого енергоспоживання відомих методів сушіння на основі існуючих даних.

Викладення основних результатів дослідження. В країнах Євросоюзу та США найбільшої популярності набули такі методи сушіння ягід лохини: сублімаційне (ліофільне), вакуумне, комбінування мікрохвильового випромінювання з вакуумним сушінням, інфрачервоного випромінювання та конвективного сушіння тощо. Ягоди лохини сушать цілими, пастоподібними та їх вичавки.

Дієта з високим вмістом ягід асоціюється зі зниженням ризику серцево-судинних захворювань, а також раку та діабету через високий вміст у них поліфенолів (Skupień та ін., 2006). Нині оцінюються різні методи обробки, щоб визначити, як переробка може вплинути на рівні цих біологічно активних речовин.

Протягом десятиліть конвективне сушіння було однією з найдавніших технологій у харчовій промисловості (Kaveh та ін., 2021). Відомо, що в тепловому балансі процесу сушіння 40% енергії втрачається на випаровування вологи, що є показником ефективності сушарок. Основними проблемами при використанні методу конвективного сушіння є: значні втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом; низька інтенсивність процесу волого-видалення при використанні невисоких температур сушіння; залежність ефективності роботи сушарки від вологості атмосферного повітря. Вирішення цих проблем в ІТТФ НАН України пропонуються через: утилізацію теплоти, яка йде з відпрацьованим сушильним агентом; примусове осушення сушильного агента з метою інтенсифікації масообміну; керовані умови процесу зневоднення (Петрова та ін., 2018).

Зарубіжними вченими було представлено результати досліджень впливу конвективного сушіння на тривалість зневоднення ягід лохини сорту О'Ніл провінції Саламанка, Чилі, а також виконане математичне моделювання та зіставлення отриманих експериментальних і теоретичних даних (López та ін., 2010).

Зразки сушили в конвективній сушарці лабораторного типу (Vega-Gálvez та ін., 2008, при режимних параметрах 50, 60, 70, 80 і 90°C, $v = 2,0 \pm 0,1$ м/с; розмір проби, маса зразка та насипна щільність становили $d = 0,7\text{--}1,5$ см, $m = 14,67 \pm 1,81$ г і $\rho = 2,9 \pm 0,3$ кг/м³ відповідно.

Перед сушінням зразки попередньо обробляли з розчином Pectinex® з метою прискорення парообмінного процесу (Ochoa та ін., 2002). Після цього зразки висушували до моменту досягнення ними постійної ваги (стану рівноваги). Далі визначали експериментально вплив температури теплоносія (°C) на характер кінетики експериментальних кривих сушіння зразків лохини (López та ін., 2010).

На основі отриманих даних дослідниками було побудовано графіки залежностей вологовмісту матеріалу від часу зневоднення (López та ін., 2010). Криві сушіння мали закономірну форму, притаманну для кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл. Класичною була також тенденція: чим вища температура теплоносія, тим меншою за величиною є загальна тривалість зневоднення зразків.

Також дослідниками була застосована модель Вейбулла у вигляді рівняння (1), яке використовувалося для опису кінетики сушіння:

$$MR = \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad (1)$$

де α — параметр форми; β — перетворюючий параметр моделі Вейбулла, хв; а t — вибірка часу.

Рівняння (1) було застосовано для опису кінетики хімічних, ферментативних і мікробіологічних процесів деградації, а також у процесі сушіння (Marabi та ін., 2003; Uribe та ін., 2009).

У цьому рівнянні залежною змінною є коефіцієнт вологості, який описується рівнянням (2).

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}}, \quad (2)$$

де X_{wo} , X_{wt} і X_{we} є початковими значеннями у реальному часі та рівноважна вологість відповідно, г води/г сухого матеріалу.

Варто відмітити, що за результатами порівняння розрахункових даних з даними експерименту запропонована модель Вейбулла у (López та ін., 2010) задовільно описує процес конвективного сушіння ягід лохини.

Але варто зазначити, що пониження якості було не так виражене при високих температурах (80—90°C) порівняно з низькими температурами (50—60—70°C), де більш тривалий процес призводить до помітного зниження поживних властивостей і антиоксидантої активності, потребує детальнішого вивчення (López та ін., 2010).

Одним із методів, якому приділяється велика увага протягом останнього десятиліття, є використання мікрохвильового випромінювання в процесі сушіння (Маренченко, 2020). Мікрохвильове випромінювання — електромагнітне випромінювання, що охоплює діапазони хвиль довжиною від 1 м до 1 мм і частотою

від 300 МГц до 300 ГГц (Енциклопедія Сучасної України: електронна версія, 2019). Коли ці хвилі проходять через тканини, полярні молекули, такі як вода та солі, вібрують, і ця вібрація спричиняє перетворення енергії мікрохвильового випромінювання в тепло. Також задіяні інші механізми, такі як транспортування іонів, які сприяють утворенню тепла всередині зразка. На відміну від інших методів сушіння, при яких тепло має проникати від поверхні до глибини, при цьому методі тепло виробляється в тканині самого харчового продукту (Kumar та ін., 2020; Rattanadecho та ін., 2016). Проте такий метод потребує обережності при реалізації через імовірність втрати біологічної цінності харчової рослинної сировини.

Мікрохвильове вакуумне сушіння (MIVAC®) — це новітній засіб зневоднення, короткий вплив якого переважно зберігає дуже важливі харчові властивості, використовує значно менше енергії та часу порівняно з класичними технологіями зневоднення (Mej'ia-Meza та ін., 2008). Однак експлуатаційні витрати можуть бути вищими, що призводить до збільшення вартості зневодненого продукту. Тому комбінація звичайного методу сушіння, наприклад, зневоднення нагрітим повітрям за допомогою мікрохвильового вакуумного та/або сублімаційного сушіння, може знизити витрати на зневоднення, зберігаючи поживні та якісні властивості зневодненої їжі. Таким чином дослідження (Mej'ia-Meza та ін., 2008) полягали в кількісній оцінці впливу нагрітого повітря, сублімації та мікрохвильового вакуумного сушіння окремо та в комбінації на утримання окремих поліфенолів, загальних поліфенолів, антоціанів та антиоксидантну активність у сушеній лохини (*Vaccinium corymbosum* L.):

1. Досліджено процес сублімаційного сушіння: зразки лохини обробляли хлоридом кальцію (CaCl_2) при -23°C протягом однієї години. Сушіння сублімацією проводили за допомогою сушарки Freezemobile 24-Unitop (VirTis Company, Gardiner, NY, USA) при вакуумному тиску 20 Мілітор ($\approx 2,67$ Па), температурі нагрівальної плити 20°C і температурі конденсатора -60°C . Час висихання для зниження вмісту води до 5,0% становив 72 години.

2. Досліджено сушіння нагрітим повітрям: зразки сушили при $76,6^\circ\text{C}$ протягом 4,5 год у спеціально виготовленій конвективній сушарці з гарячим повітрям до кінцевого вмісту води 5%.

3. Досліджено мікрохвильове вакуумне сушіння за допомогою спеціально виготовленого лабораторного мікрохвильового вакуумного блоку, який складається з магнетрона. Заморожену лохину (1000 г) сушили при $65,5^\circ\text{C}$ протягом 90 хв при 3000 Вт і вакуумному тиску 20 торр (2,6 кПа).

4. Досліджено комбіноване зневоднення нагрітим повітрям і мікрохвильовим вакуум-сушінням зразків свіжої лохини, які були попередньо висушені з вмістом води від 50 до 40% за допомогою спеціально створеної конвективної сушарки з гарячим повітрям при $98,8^\circ\text{C}$ протягом 45 хвилин. Попередньо висушені зразки чорниці (1000 г) заморожували -10°F (-23°C) протягом години і зберігали замороженими при -40°C . Заморожені зразки сушили при $71,1^\circ\text{C}$ протягом 60 хв при потужності 3000 Вт і вакуумному тиску 2,6 кПа.

Зневоднення лохини за допомогою мікрохвильової вакуум-сушарки та комбінованого зневоднення нагрітим повітрям продемонстрували значно більш високе

утримання (232 та 297 мг/100 г відповідно) елагової кислоти (природного антиоксиданту фенолу), ніж сушіння нагрітим повітрям (37,7 мг/100 г) і сублімаційне сушіння (25,7 мг/100 г). Глікозид кверцетину зберігся у вищій концентрації в лохині за сублімаційного сушіння (332 мг/100 г), далі за цим показником іде сушіння в мікрохвильовій вакуум-сушарці (201 мг/100 г), комбіноване сушіння нагрітим повітрям та мікрохвильовим зневодненням у вакуум-сушарці (156 мг/100 г) і нагрітим повітрям (137 мг/100 г). Висушена лохина комбінованим сушінням нагрітим повітрям та мікрохвильовим зневодненням у вакуум-сушарці показали дещо вищу затримку (84,5 і 26,4 мг/100 г) в глікозиді кемпферолу, тоді як майже жоден з цих флавоноїдів не був відновлений у висушених зразках сублімацією та комбінованим сушінням нагрітим повітрям, та окремо мікрохвильовим сушінням у вакуум-сушарці.

Дослідники також повідомили, що сублімаційне сушіння призводило до більшого збереження загальних поліфенолів та антоціанів, а також до вищої антиоксидантної активності у глікозидних формах. Поліфеноли аглікону були більш термостабільні в умовах зневоднення, що використовуються тут, і в деяких випадках були присутні в лохині, обробленої комбінованим сушінням нагрітим повітрям та мікрохвильовим сушінням у вакуум-сушарці, на тих же рівнях, що й у ліофілізованих. Комбіноване сушіння нагрітим повітрям та мікрохвильове сушіння у вакуум-сушарці призвело до меншої втрати антиоксидантів і антиоксидантної активності, ніж сушіння гарячим повітрям.

Проте сушіння в такий спосіб (*конвективне сушіння–заморожування–мікрохвильове вакуум-сушіння*) може призвести до зростання вартості кінцевого продукту та додаткових енергетичних витрат.

В американському патенті № 480,473 «Process of freeze-drying blueberries» запропоновано винахід для сублімаційного зневоднення лохини, суть якого полягає в тому, що ягода перфорується однією або кількома голками, але проколюють не тільки зовнішні покриви або частини шкірки ягоди, але також і значну кількість внутрішньої серцевини. Хоча одного проколу буде достатньо, щоб забезпечити покращення швидкості зневоднення та регідrataції, автори винаходу рекомендують зробити більше однієї такої перфорації, наприклад, у середньому від 2 до 3 проколів на ягоду, залежно від розміру ягоди. Більші ягоди зазвичай потребують більшої кількості перфорацій. Перфоровану таким чином ягоду можна сушити заморожуванням до форми, яка легко регідratується. Підготовлену у такий спосіб ягоду заморожують, в ідеалі з дуже повільною швидкістю, переважно близько 10—20 годин, до температури 0°F (–17,77778°C) і нижче. В результаті загальний час сублімаційного сушіння проколотої таким чином лохини до бажаного стабільного рівня вологості менше 3% буде становити близько 18 год, що на 2/3 менше часу, зазвичай необхідного для сублімації непроколотої ягоди. Було виявлено, сублімований продукт не зморщується, вигляд зовнішньої частини покриву не змінюється і натомість зберігає кулясту форму. Ще однією складністю є те, що важливо протягом операції сублімаційного сушіння підтримувати ягідну серцевину, особливо її рідку фазу в затверділому стані, щоб не відбувалося «розплавлення» рідини, принаймні до кінцевої вологості менше ніж 5%. Бажано

досягти значення менше 3%, оскільки в іншому випадку фрукти та ягоди зморщуються. Таким чином шкірні покриви зменшуються та візуально схожі на чорнослив, маючи ряд зморшок, які залишаються на плодах після його повторного зволоження.

Недоліками представленого способу переробки лохини є високі енергетичні витрати на попередню підготовку та сублімаційне сушіння ягід. Варто також зазначити, що така попередня підготовка є складним процесом при реалізації серійної переробки.

У промисловості при реалізації сублімаційного сушіння виникають проблеми з визначенням раціональних режимних параметрів процесу та пошуком технічних рішень, що могли б забезпечити високі техніко-економічні показники роботи сублімаційних установок зі збереженням високої якості отриманих харчових продуктів (Завалий та ін., 2016). Адаптувати в промислових умовах результати досліджень, які отримано на лабораторній установці, неможливо і некоректно (Сімахіна та ін., 2011).

Ще одним не менш популярним методом є вакуумне сушіння лохини. Запропоновано перед обробкою заморожені ягоди лохини розморожувати в холодильнику при 4°C протягом 24 год (Kim, 2012). Далі розморожені ягоди мололи в кухонному комбайні протягом 2 хвилин. До отриманої суспензії додавали три різні дози мальтодекстрину: 0,3 кг/кг сухої твердої речовини, 0,45 кг/кг сухої твердої речовини і 0,6 кг/кг сухої твердої речовини. Далі суміш перемішували протягом 5 хвилин. До кожного зразка додавали рівні кількості трикальційфосфату (16,7 г/кг сухої твердої речовини лохини) і перемішували за допомогою кухонного комбайна протягом 2 хвилин. Перед сушінням зразки зберігали при 4°C.

Для сушіння ягідних вичавок використовували вакуумну стрічкову сушарку лабораторного масштабу (Zwag, LKM-101, Zchokke Wartman Ltd. Bucher, Доттінген, Швейцарія).

Сушарка містила вакуумовану камеру з конвеєрною стрічкою з тефлоновим покриттям шириною 20,33 см, яка проходить через три незалежно керовані нагрівальні пластини та одну охолоджувальну плиту. Над стрічкою розташовувалася радіаційний нагрівач шириною 22,9 см і охоплювала довжину провідникових нагрівальних пластин.

Для забезпечення вакууму в камері використовувався вакуумний насос Seal 80 CFM індійського виробництва. Тиск у процесі підтримувався між 3,3—60 кПа. Для визначення температури нагріву були використані вбудований сенсорний екран і програмований логічний контролер. Три різні температури (80, 95 або 110°C) використовували для сушіння суспензії ягід. У кожному циклі сушіння переробляли приблизно 500 г суспензії. Зразки висушували до досягнення цільової активності води (a_w) $0,2 \pm 0,02$. При 80°C зразки сушили 70 хв, при 95°C — 60 хв, при 110°C — 50 хвилин. У більшості випадків повний вакуум не вводили відразу, щоб обмежити надмірне розширення суспензії та вибух проби на стінки сушарки. Таким чином при 80°C тиск утримували на рівні 30 кПа протягом 35 хв, перш ніж знизити його до 3,3 кПа. При 95°C початковий тиск становив 50,7 кПа

протягом 20 хв, а потім змінювали до 3,3 кПа. При 110°C тиск 60 кПа підтримували протягом 20 хв, а потім змінювали до 3,3 кПа.

Оскільки цільні ягоди лохини містять високий рівень цукру, операція сушіння була нелегкою через липкість продукту. Отриманий порошок із лохини описаним вище способом характеризувався покращеною гігроскопічністю та сипучістю виключно за рахунок додавання мальтодекстрину.

Ще одним відомим методом переробки ягід лохини є розпилювальне сушіння, яке широко використовується для виробництва сушеної продукції та інгредієнтів у багатьох напрямках харчової промисловості (Chegini та ін., 2008). Розпилювальне сушіння фруктового соку з високим вмістом низькомолекулярних цукрів і органічних кислот досить складне. Щоб інтенсифікувати процес сушіння, зазвичай, додають деякі носії в сік або концентрат. У світі існує багато досліджень з виробництва порошку з меду, кавуна, з апельсинового та яблучного соків, а також різні порошки з концентрованих фруктових соків шляхом розпилювального сушіння з білковою сироваткою, мальтодекстрином і стабілізатором гуміарабік як носіями (Oberoi та ін., 2015; Chegini та ін., 2005; Jaya та ін., 2004; Shi та ін., 2013).

Фізико-хімічні властивості кінцевого продукту, при застосуванні такого методу, в основному залежать від температури теплоносія, швидкості потоку повітря, швидкості подачі вихідного продукту, швидкості розпилювача, типу носіїв та їх концентрації (Chegini та ін., 2008).

Дослідження (Darniadi та ін, 2017) полягало в розробці піноматеріалу з лохини, отримання порошоків після ліофілізованого та розпилювального сушіння, а також порівнянні впливу різних методів сушіння та носіїв на фізичні властивості сухих подрібнених і відновлених продуктів (Darniadi та ін, 2017).

Об'єктом сушіння був концентрований сік із лохини, до якого додавали мальтодекстрин та ізолят сироватки білка, останні використовували як стабілізатор піни і піноутворювач відповідно.

Отриманий спінений сік із лохини наносили на круглу сковороду з тефлонним покриттям, заморожували у швидкісному морозильнику при -30°C протягом 6 год і далі проводили ліофілізацію сублімаційним сушінням при -55°C і тиску 0,04 мбар, протягом 24 год. Отриманий висушений шар далі подрібнювали для одержання порошку (Darniadi та ін, 2017).

Також одержану суміш із соку та спінювачів сушили методом розпилювального сушіння. Умови сушіння були однаковими для кожного циклу експерименту з температурою на вході 150°C, температура повітря на виході 101°C, швидкість аспірації 35 м³/год, тиск повітря 0,41 бар і діаметр насадки 1,5 мм. Використані швидкості подачі суміші становили 180 і 360 мл/год (Darniadi та ін, 2017).

Після кожного процесу сушіння порошки лохини збирали з циклону та зберігали у темряві в попередньо зважених, герметичних контейнерах у холодильнику при 5°C для подальшого аналізу (Darniadi та ін, 2017). Одразу варто зазначити, що сушіння розпиленням фруктового соку, зокрема лохини, полягало в тому, що використовувалася висока температура теплоносія (>100°C). Це може посилити деградацію антоціанів у ягоді, що також зазначалося авторами дослідження (Darniadi та ін, 2017).

Після сушіння порошки дослідили на регідrataцію, насипну щільність і барвні речовини. Вчені отримали дані, що порошки мали високий рівень регідrataції в обох випадках, а при розпилювальному сушінні спостерігалась вища насипна щільність (Darniadi та ін., 2017).

Авторами зазначалося, що барвні речовини (характеристика кольору) були на невисокому рівні після розпилювального сушіння, колір отриманого порошку суттєво відрізнявся від вихідного продукту. А отже, цей метод не може забезпечити різноманітність галузей застосування отриманого порошку із лохини, що позбавляє його універсальності.

Окрім сублімації та вакууму, інтенсифікації процесу сушіння ягід лохини можна досягти через вплив інфрачервоного випромінювання. Застосували комбіноване сушіння ягід через поєднання сублімації та ІЧ випромінювання (Reyesa та ін., 2011). Попередня підготовка: відбиралися зразки (ягоди) оптимального діаметра і розрізалися навпіл або на четверо частин з подальшим заморожуванням.

Сушіння проводили в декількох варіаціях: розмір частинок (половинки; чверті), тип енергії (конвекція з інфрачервоним випромінюванням; конвекція) та сублімація (Reyesa та ін., 2011).

Було виявлено, що частинки, піддані вакуумній сублімації, зберігали свою початкову форму та розмір. А застосування ІЧ-випромінювання викликало потемніння поверхні заморожених плодів (Reyesa та ін., 2011).

На основі отриманих даних було помічено, що зневоднення більших частинок мало більш тривале сушіння. Сублімація надала можливість досягти найнижчого кінцевого вологовмісту. Крім того, ІЧ-застосування прискорило процес сушіння. ІЧ зменшив відносний вологовміст (X/X_0) до значень нижче 0,1 перед 12-годинним сушінням, імовірно, через більший запас енергії (Reyesa та ін., 2011).

На харчові властивості лохини впливають умови експлуатації, які використовуються в процесі сублімаційної сушки.

Вченими із Чилі було досліджено сушіння лохини із застосуванням омичного нагріву та імпульсного вакуумного впливу з подальшим конвективним висушуванням.

Як відомо, осмотична дегідrataція — операція, що використовується для часткового видалення води із рослинних тканин шляхом занурення в гіпертонічний розчин, цукор та/або соляний розчин для зниження вологості харчових продуктів до фактичного процесу сушіння (Yadav та ін., 2014).

Лохина — ягода, що швидко псується, тому новітні технології зосереджені на покращенні збереження біоактивних сполук і продовженні її терміну придатності. Було оцінено вплив омичного нагріву та вакуумних імпульсів (при імпульсних вакуумних обробках вакуум 5 кПа застосовували протягом 15 хв на початку процесу) на процеси зневоднення та утримання поліфенольних сполук осмодегідратованої лохини (сорт Tifblue) (Moreno та ін., 2016).

Обробку проводили з використанням 65% розчином сахарози, електричним полем 13 В/см при 30, 40 або 50°C протягом 300 хв та конвективним сушінням при 50, 60 або 70°C для отримання сушеної лохини. В роботі проаналізовано вміст води, розчинних твердих речовин та фенольних сполук. Комбінація омичного нагрівання з імпульсною вакуумною обробкою інтенсифікує масообмін в

осмодегідратованій лохині, особливо при вищих температурах. Однак втримання поліфенолів була більшою при нижчих температурах (Moreno та ін., 2016).

Оброблені зразки ягід сушили при різних температурах 50, 60 і 70°C до досягнення залишкової вологості менше або рівній 20% (Moreno та ін., 2016).

Час висихання зразків залежить від температури повітря та осмотичної обробки. Необроблені зразки (еталон) також сушили при різних температурах 50, 60 і 70°C (Moreno та ін., 2016).

Час, необхідний для зменшення вільної води зразка, був коротшим при більш високих температурах сушіння для всіх зразків. Так, необробленого зразка час скоротився з 57,5 год при 50°C до 14,17 год при 70°C (Moreno та ін., 2016). Цей температурний ефект очікувався, оскільки більш високі температури полегшують видалення води. Крім того, застосування осмотичних методів обробки зменшило час висихання порівняно з еталоном (свіжа ягода). Також спостерігалось, що час зневоднення в оброблених зразках за допомогою омичного нагрівання був коротшим, ніж оброблений звичайним нагрівом. Вакуумний імпульс з омичним нагріванням, кінцевий вміст води було досягнуто за 22,5 год, при цьому для омичного нагріву та імпульсного вакууму необхідно 45—54 год. Температура 60°C скоротила час зневоднення зразка до половини, для порівняння: час сушіння для осмотичної дегідратації з омичним нагрівом становив 13,3 год. Порівняно з 24,1 год для еталону, зневоднені при 70°C показали подальше скорочення часу висихання порівняно з іншими температурами, з осмотичною дегідратацією з омичним нагрівом час сушіння зменшено до 10 год, а імпульсно-вакуумному з омичним нагріванням та імпульсно-вакуумному до 10,7 та 10,8 год відповідно (Moreno та ін., 2016).

Отже, застосування проміжної температури процесу (40°C) було обрано як попередню обробку перед подальшим сушінням. Дослідники зазначили, що оброблені зразки покращують утримання поліфенолів після висихання порівняно з необробленими зразками, а використання імпульсного вакууму та омичного нагрівання під час обробки осмотичної дегідратації при 40°C протягом 240 хв і подальше сушіння при 60°C може бути найкращим процесом для зневоднення лохини, враховуючи, що це покращує масообмін, досягаються менші втрати фенольних компонентів і скорочується загальний час сушіння. Застосування осмодегідратації перед сушінням на повітрі зменшує вміст води, не викликаючи фазових перетворень, зберігаючи якість ягід і скорочення часу висихання на повітрі зразка в результаті синергетичного ефекту імпульсного вакууму та омичного нагрівання (Moreno та ін., 2016).

Проте інформація про питомі енергетичні витрати не повідомлялася, тож технологія переробки ягід лохини потребує додаткових капітальних витратків не є адаптованою під переробку у промислових масштабах.

Досліджувалась загальна тривалість зневоднення заморожених ягід лохини та питоме енергоспоживання зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння (Tamás, 2021).

Ягоди лохини були попередньо підготовлені швидким заморожуванням при температурі $t = -25^{\circ}\text{C}$ в морозильній камері (FT34MKII, Armfield Ltd., Англія).

Середній діаметр ягід складав $1 \pm 0,2$ см. Початкова вологість зразків визначалась гравіметричним методом у лабораторній конвективній печі (модель LP302, LaborMIM, Угорщина) при температурі $105 \pm 1^\circ\text{C}$ до досягнення постійної маси. Середній вміст води зразків був 88,1%, експериментальний процес зневоднення тривав до тих пір, доки залишковий вміст води не становив близько 2—3% (Tamás, 2021).

Дослідження процесу зневоднення реалізовувались такими методами: сушіння нагрітим повітрям, під вакуумом, інфрачервоне сушіння, сублімація, а також комбінування цих методів (принцип поєднання детально представлено в табл. 2) (Tamás, 2021). Сушіння нагрітим повітрям реалізовувалося у сушильній шафі (модель LP302, LaborMIM, Угорщина) при режимному параметрі теплоносія $t = 60^\circ\text{C}$, $v = 1$ м/с; зразок викладений в один шар. Вага зразка вимірювалася щогодини (Tamás, 2021).

Для зневоднення під вакуумом використовувалася лабораторна вакуумна сушарка (модель Kambic VS-50C, Kambic Lab, Словаччина) (Tamás, 2021).

Вакуумний насос забезпечував тиск у камері 5 кПа в процесі сушіння. Температура в камері становила 60°C , температура зразків під час експерименту відслідковувалася через термопари типу Т. Маса зразка, викладеного в один шар, реєструвалася кожну годину.

Інфрачервоне сушіння зразків лохини реалізувалося в лабораторній цифровій інфрачервоній сушарці (модель Precisa HA60, Precisa Instruments AG, Dietikon, Швейцарія) (Tamás, 2021).

Два інфрачервоних нагрівачі напругою 230 В працювали з максимальною потужністю 410 Вт. Піддон для зразків протягом всього експерименту тримався на відстані 15 см нижче інфрачервоних нагрівачів. Температура теплоносія підтримувалася на рівні 60°C , що відповідає густині теплового потоку $4,5$ кВт/м². Маса зразків лохини, розташованих в один шар, вимірювалася за допомогою електронних вагів Precisa HA60 з інтервалом 5 хв під час експерименту.

Таблиця 2. Опис комбінування методів сушіння

№ п/п	Назва	Перша стадія сушіння	Друга стадія сушіння
1	2	3	4
1	Сушіння нагрітим повітрям2-сублімація	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 2 годин до вологовмісту матеріалу 54,5%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,6%
2	Сушіння нагрітим повітрям3-сублімація	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 3 годин до вологовмісту матеріалу 40,3%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,4%
3	Сушіння нагрітим повітрям4-сублімація	Попереднє сушіння нагрітим повітрям до 60°C протягом 4 годин до вологовмісту матеріалу 33,7%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,9%
4	Інфрачервоне сушіння5-сублімація	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 5 хвилин до вологовмісту матеріалу 46,9%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,1%
5	Інфрачервоне сушіння10-сублімація	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 10 хвилин до вологовмісту матеріалу 35,4%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,2%

1	2	3	4
6	Інфрачервоне сушіння15-сублімація	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 15 хвилин до вологовмісту матеріалу 26,5%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,6%
7	Вакуумне сушіння2-сублімація	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 2 годин до вологовмісту матеріалу 59,2%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 3%
8	Вакуумне сушіння3-сублімація	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 3 годин до вологовмісту матеріалу 44,4%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,7%
9	Вакуумне сушіння4-сублімація	Попереднє сушіння з температурою у камері 60°C протягом 4 годин до вологовмісту матеріалу 36,2%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,8%

Сушіння сублімацією проводилося з використанням лабораторної морозильної сушарки Christ Alpha 1-4 LSC Plus, Martin Christ GmbH, німецького виробництва. Температура нагрівачів утримувалася на рівні 20°C, а охолоджувача на рівні -45°C. Температурна зразків вимірювалася термopарамп типу Т. Під час сушіння 100 г зразків (в 1 шар) були зневоднені в камері з внутрішнім тиском 50 Па, що створював вакуумний насос.

Результати дослідження загальної тривалості висихання для кожного застосованого методу представлено на рис. 3. Сублімація (тривалість 22 год) має найдовшу тривалість зневоднення лохини (Castagnini та ін., 2015). Попереднє заморожування зразка лохини сприяє хорошему впливу на тривалість сублімації, так як скоротило час висихання з 26 до 22 год.

Порівняно з сушінням сублімацією комбіноване зневоднення інфрачервоним сушінням15-сублімація значно скоротило час висихання на 53,4%. Рис. 3 показує, що час висихання комбінованим методом інфрачервоне сушіння—сублімація (785, 670 і 615 хв) було самим короткотривалим серед комбінованих методів сушіння.

Висушували лохину в сублімаційній сушарці, забезпеченою інфрачервоною галогенною лампою потужністю 150 Вт (Reyes та ін., 2011). Було помічено, що застосування інфрачервоного сушіння прискорило процес сушіння. Час роботи сублімаційного сушіння було скорочено до 12 год за допомогою цього принципу. Час сушіння, необхідний для зневоднення за допомогою інфрачервоне сушіння15-сушіння сублімацією для досягнення вологості 2,6%, був в 1,46 раза менший, ніж у методів сушіння нагрітим повітрям4-сушіння сублімацією і вакуумне сушіння4-сушіння сублімацією відповідно. Підвищення інтенсивності виділення теплоти в інфрачервоне сушіння могло призвести до швидкого підвищення температури на поверхні продукту, що призвело б до збільшення тиску водяної пари всередині матеріалу і, як наслідок, до більш високої швидкості сушіння (Datta, та ін., 2002).

Було виявлено, що час сушіння значно скоротився зі збільшенням часу попереднього сушіння (2—3—4 год і 5—10—15 хв) за постійної температури сушіння (60°C) і інфрачервоного випромінювання з густиною теплового потоку 4,5 кВт/м².

Окрім того, встановлено, що 5-годинне попереднє сушіння під вакуумом, сушіння нагрітим повітрям і 20-хвилинне попереднє сушіння інфрачервоним випромінюванням викликають помітне потемніння (так звана реакція Майяра) на поверхні зразків.

Вплив одно- і двоступінчатих методів сушіння на питоме споживання енергії (МДж/кг води) представлено на рис. 4.

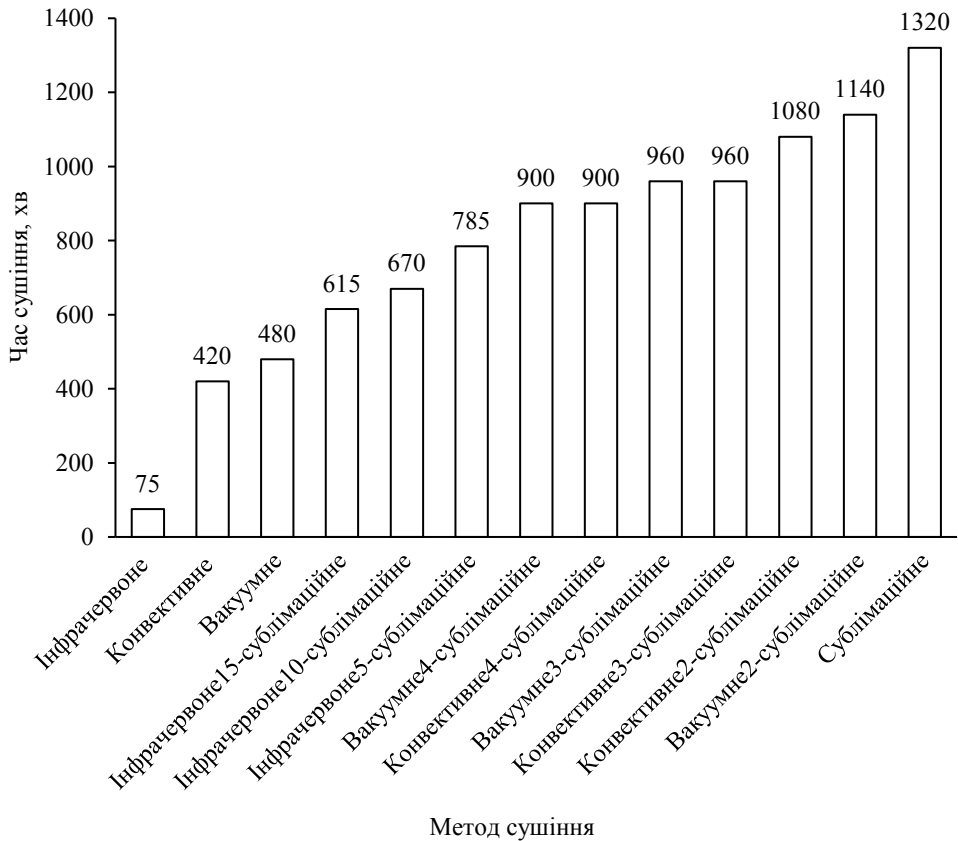


Рис. 3. Загальна тривалість зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння

Дослідниками було помічено, що в міру скорочення часу висихання загальне питоме споживання енергії зменшується. В експерименті із застосуванням комбінованого сушіння енергоспоживання значно знижується зі збільшенням часу попереднього сушіння (з 2 до 4 год і з 5 до 15 хв). Найвищий рівень показника питомого енергоспоживання був зареєстрований при сушінні сублімацією (496,1 МДж/кг води), якщо порівняти з іншими методами сушіння (Wu та ін., 2019).

Питоме споживання енергії під час зневоднення вимірювалось мікроконтролером перевірки витрат на енергію (модель ЕКМ 265, Conrad Electronic, Німеччина). Також було розраховане споживання енергії, необхідне для видалення 1 кг води (Flink, 1977). Питоме споживання енергії (ПСЕ) в МДж/кг води оцінювалось таким чином (3):

$$PCE = \frac{E \times 3,6}{W_0 - W_f}, \quad (3)$$

де E — потужність електроенергії, що споживається, кВт/год; W_0 — початкова маса сировини, кг; W_f — кінцева маса висушеного зразка, кг.

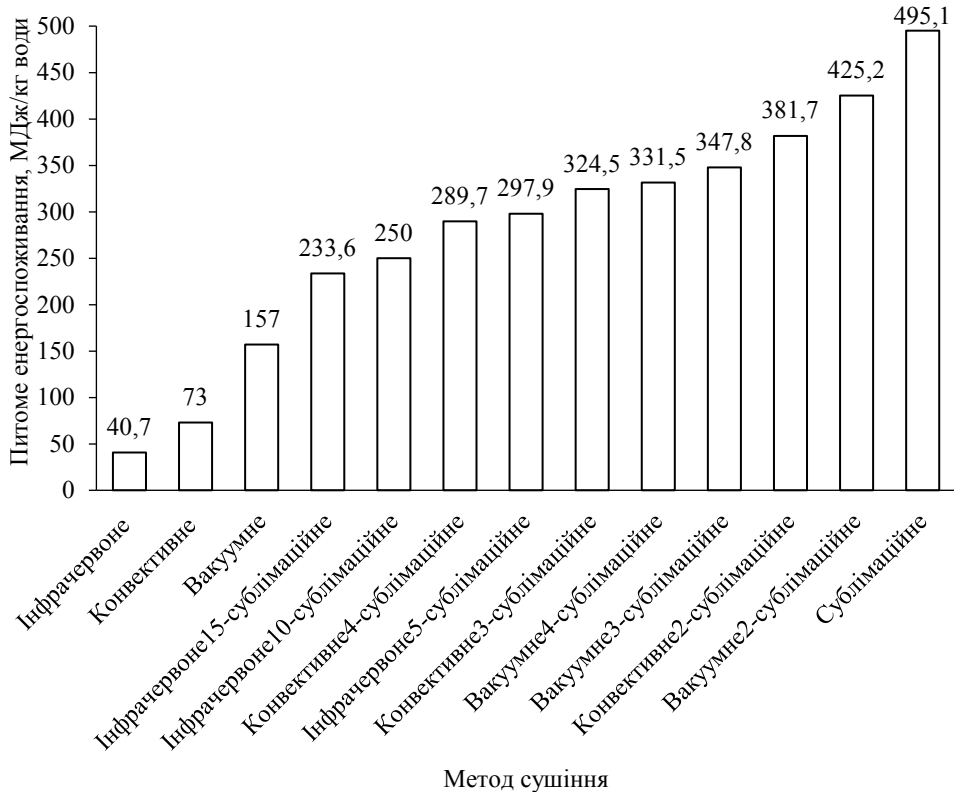


Рис. 4. Питоме енергоспоживання зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння

Причина високого енергоспоживання (що є основним недоліком цього методу) сублімації полягає в тому, що, зазвичай, використовуються електричні нагрівальні плити для забезпечення тепла, необхідного для сублімації льоду, з низькою теплопровідністю. При сублімаційному сушінні базова енергія, необхідна для видалення 1 кг води, майже в два рази вища, ніж при звичайному сушінні. В цьому дослідженні питоме споживання енергії сушіння сублімацією приблизно в 6,8 раза перевищує споживання енергії конвективного сушіння. Найнижче питоме енергоспоживання було пов'язане з методом інфрачервоного сушіння-сублімації. Енергоспоживання у методу інфрачервоного сушіння15-сублімація на 52,9% нижче енергоспоживання сушіння сублімацією, різниця між ними суттєва.

Порівняно із сублімаційним сушінням, інфрачервоне-сублімаційне сушіння може ефективно скоротити час сушіння і загальне споживання енергії, особливо

інфрачервоне сушіння 15-сублімація. Інфрачервоне сушіння 15-сублімація скоротило час сушіння на 53,4% та споживання енергії на 52,9% порівняно з одноступеневим сублімаційним сушінням.

Було помічено, що час висихання матеріалу сушіння нагрітим повітрям-сублімація аналогічний часу висихання зразків при вакуумному сушінні-сублімації. Питоме енергоспоживання сушіння нагрітим повітрям 4-сублімація було таким самим, як і інфрачервоне сушіння 15-сублімація.

Отже, як видно з рис. 3 та 4, найраціональнішими методами сушіння ягід лохини є: інфрачервоне, конвективне та вакуумне. Але сушіння інфрачервоним випромінюванням викликає погіршення якісних характеристик матеріалу, а зневоднення у вакуумі відоме високими витратами енергії.

Висновки

Теоретичний аналіз вищевикладених існуючих досліджень переробки ягід лохини на сушену продукцію показав, що зарубіжними дослідниками у більшості випадків надається перевага більш енергоємним методам сушіння: вакуумному, сублімаційному та їх комбінуванню між собою і з класичним конвективним сушінням. Інфрачервоне сушіння застосовується як попередня підготовка і не рекомендоване як класичний метод сушіння ягід лохини, оскільки викликає погіршення якості кінцевого продукту переробки.

Усі вищезазначені в статті методи, особливо етап попередньої підготовки, реалізовані в лабораторних умовах, однак не були реалізовані на промисловому обладнанні. Отже, постає питання ефективної підготовки та розробки енерго-ефективної теплотехнології сушіння ягід лохини в промислових масштабах.

Література

- Балан, А. (2019). Сучасні знання — драйвер розвитку ягідного сектору України. *Ягідник*, 4, 10. Взято з <http://www.jagodnik.info>.д.
- Галат, Л. М. (2021). Експортний потенціал та проблеми розвитку галузі ягідництва України. *Агросвіт*, 1—2, 46—55. <http://doi.org/10.32702/2306-6792.2021.1-2.46>.
- Дмитренко, Н. (2018). Вплив розчинних речовин на стан води в рослинних тканинах та кінетику їх сушіння. *Scientific Works*, 82(1), 103—108. <http://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1015>.
- Завалий, А. А., & Снежкин, Ю. Ф. (2016). *Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabileльных материалов*. Симферополь: АРИАЛ. Взято з <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000009942>.
- Кухтіна, І. (2020). Новий сезон на ринку фруктів та ягід: тенденції та перспективи. *Агробізнес сьогодні*, 11, 54—57. Взято з <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17888-novyi-sezon-na-rynku-fruktiv-ta-iahid-tendentsii-ta-perspektyvy.html>.
- Маренченко, О. І. (2020). *Інноваційні технології зневоднення харчової сировини*. (Дис. докт. філос.). Одеська національна академія харчових технологій МОН України, Одеса. Взято з <https://ontu.edu.ua/download/dissertation/phd/Disser/2020/Disser-PhD-Marenchenko.pdf>.
- Петрова, Ж. О., & Снежкін, Ю. Ф. (2018). *Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини*. Київ: Наукова думка. Взято з <http://www.ndumka.kiev.ua>.
- Погожих, М. І., & Пак, А. О. (2015). *Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини*. Харків: ХДУХТ. Взято з https://shron1.chtyvo.org.ua/Pak_Andrii/Enerhoefektyvni_sposoby_pererobky_kharchovoi_syrovyyny_sushinnia_plodovo-iahidnoi_syrovyyny.pdf.

Поперечна, О. (2020). Лохина — ягода № 1 в Україні за площею комерційних насаджень. *Ягідник*, 1, 19—21. Взято з <http://www.jagodnik.info/lohy-na-yagoda-no1-v-ukrayini-za-ploshheyu-komertsijnyh-nasadzhen>.

Сімахіна, Г. О., & Науменко, Н. В. (2011). *Низькотемпературна безвідходна технологія сублімованих продуктів з вуглеводовмісної сировини: Низькі температури у технологіях оздоровчих продуктів*. Київ: Сталь, 235-317. Взято з <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/633>.

Bridle, P., & Timberlake, C. F. (1997). Anthocyanins as natural food colours-selected aspects. *Food Chemistry*, 58, 103—109. [http://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00222-1](http://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00222-1).

Brownmiller, C., Howard, L. R., & Prior, R. L. (2008). Processing and storage effects on monomeric anthocyanins, percent polymeric color, and antioxidant capacity of processed blueberry products. *Journal of Food Science*, 73, 72—79. <http://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00761.x>.

Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D., & Lebert A. (1993). Spray Drying of Concentrated Fruit Juices. *Dry Technology*, 11, 1081—1092. <http://doi.org/10.1080/07373939308916884>.

Castagnini, J. M., Betoret, N., Betoret, E., & Fito, P. (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT — Food Science and Technology*, 64, 1289—1296. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.044>.

Chegin, G. R., Khazaei, J., Ghobadian, B., & Goudarzi, A. M. (2008). Prediction of process and product parameters in an orange juice spray dryer using artificial neural networks. *Journal of Food Engineering*, 84, 534—543. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.007>.

Clary, C. D., Wang, S., & Petrucci, V. F. (2005). Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. *Journal of Food Science*, 70(5), 344—9. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09975.x>.

Darniadi, S., Ho, P., & Murray, B. S. (2018). Comparison of blueberry powder produced via foam-mat freeze-drying versus spray-drying: evaluation of foam and powder properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(5). 2002—2010. <http://doi.org/10.1002/jsfa.8685>.

Datta, A. K., & Ni, H. (2002). Infrared and Hot-Air Assisted Microwave Heating of Foods for Control of Surface Moisture. *Journal of Food Engineering*, 51(4), 355—364. [http://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00079-6](http://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00079-6).

Flink, J. M. (1977). Energy Analysis in Dehydration Processes. *Food Technology*, 31, 77—84. Взято з <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302502961>.

Fracassetti, D., Del, Bo, C., Simonetti, P., Gardana, C., Klimis-Zacas, D., & Ciappellano, S. (2013). Effect of Time and storage temperature on anthocyanin decay and antioxidant activity in wild blueberry (*Vaccinium angustifolium*) powder. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 61, 2999—3005. <http://doi.org/10.1021/jf3048884>.

Jaya, S., & Das, H. (2004). Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 63, 125—134. [http://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00135-3](http://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00135-3).

Kaveh, M., Golpour, I., Gonçalves, C. J., Ghafouri, S., & Guiné, R. (2021). Determination of drying kinetics, specific energy consumption, shrinkage, and colour properties of pomegranate arils submitted to microwave and convective drying. *Open Agriculture*, 6, 230—242. <http://doi.org/10.1515/opag-2020-0209>.

Kim, M. (2012). *Vacuum-belt drying of blueberry powders* (A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of The University of Georgia in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science). The University of Georgia, Athens, Georgia. Взято з chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclclefindmkaj/https://getd.libs.uga.edu/pdfs/kim_michelle_201205_ms.pdf.

Kumar, S., Grekov, D., Prè, P., & Alappat, B.J. (2020) Microwave mode of heating in the preparation of porous carbon materials for adsorption and energy storage applications — an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109743. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109743>.

López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of Air Temperature on Drying Kinetics, Vitamin C, Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, Non-enzymatic Browning and Firmness of Blueberries Variety O'Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 772—777. <http://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>.

Marabi, A., Livings, S., Jacobson, M., & Saguy, I. S. (2003). Normalized Weibull distribution for modeling rehydration of food particulates. *European Food Research Technology*, 217(4), 311—318. <http://doi.org/10.1007/s00217-003-0719-y>.

Mazza, G. (2005). Compositional and functional properties of Saskatoon berry and blueberry. *International Journal of Fruit Science*, 5(3), 101—120. http://doi.org/10.1300/J492v05n03_10.

Mej'ia-Meza, E. I., Y'a'nez, J. A., Remsberg, C. M., Davies, N. M., Rasco, B., Younce, F., & Clary, C. (2008). Improving Nutritional Value of Dried Blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) Combining Microwave-Vacuum, Hot-Air Drying and Freeze Drying Technologies. *International Journal of Food Engineering*, 4(6), 1—6. Взято з https://www.academia.edu/18617027/Improving_Nutritional_Value_of_Dried_Blueberries_Vaccinium_corymbosum_L_Combining_Microwave_Vacuum_Hot_Air_Drying_and_Freeze_Drying_Technologies.

Moreno, J., Gonzales, M., Zúñiga, P., Petzold, G., Mella, K., & Muñoz, O. (2016). Ohmic heating and pulsed vacuum effect on dehydration processes and polyphenol component retention of osmodehydrated blueberries (cv. Tifblue). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 112–119. <http://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.005>.

Oberoi, D. P. S., & Sogi, D. S. (2015). Effect of drying methods and maltodextrin concentration on pigment content of watermelon juice powder. *Journal of Food Engineering*, 165, 172—178. [doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.06.024](http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.06.024).

Ochoa, M. R., Kessler, A. G., Pirone, B. N., Márquez, C. A., & DeMichelis, A. (2002). Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa Rubiginosa* L.) fruits. *Food Science and Technology Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 35, 400—406. <http://doi.org/10.1006/ftsl.2001.0861>.

Rattanadecho, P., & Makul, N. (2016). Microwave-assisted drying: a review of the state-of-the-art. *Dry Technology*, 34, 1—38. <http://doi.org/10.1080/07373937.2014.957764>.

Reyesa, A., Evseeva, A., Mahna, A., Bubnovicha, V., Bustosa, R., & Scheuermannb, E. (2011). Effect of operating conditions in freeze-drying on the nutritional properties of blueberries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1—16. Взято з https://www.academia.edu/47064008/Effect_of_operating_conditions_in_freeze_drying_on_the_nutritional_properties_of_blueberries.

Reyes, A., Evseev, A., Mahn, A., Bubnovich, V., Bustos, R., & Scheuermann, E. (2011). Effect of Operating Conditions in Freeze-Drying on the Nutritional Properties of Blueberries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 303—306. <http://doi.org/10.3109/09637486.2010.534078>.

Routray, W., & Orsat, V. (2011). Blueberries and Their Anthocyanins: Factors Affecting Biosynthesis and Properties. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10, 303—320. <http://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00164.x>.

Satanina, V. (2011). *Optimization of Hydrothermodynamic Technology for Blueberry Food Processing*. (A Thesis Submitted to the Faculty of The Graduate Studies of Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia for in co-operation Nova Scotia Agricultural College, Truro, Nova Scotia with the Degree Master of Science). Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia for Nova Scotia Agricultural College, Truro, Nova Scotia. Взято з [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-NSHD-14347&op=pdf&app=Library&oclc_number=870856372](https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-NSHD-14347&op=pdf&app=Library&oclc_number=870856372).

Shi, Q., Fang, Z., & Bhandari, B. (2013). Effect of Addition of Whey Protein Isolate on Spray-Drying Behavior of Honey with Maltodextrin as a Carrier Material. *Dry Technology*, 31, 1681—1692. <http://doi.org/10.1080/07373937.2013.783593>.

Skupien, K., Oszmianski, J., Kostrzewa-Nowak, D., & Tarasiuk, J. (2006). In vitro antileukaemic activity of extracts from berry plant leaves against sensitive and multidrug resistant HL60 cells. *Cancer Letters*, 236(2), 282—291. <http://doi.org/10.1016/j.canlet.2005.05.018>.

Tamás, A. (2021). Effect of different drying techniques on the drying time and energy of blueberry. *Analecta Technica Szegedinensia*, 15(1), 23—30. <http://doi.org/10.14232/analecta.2021.1.23-30>.

Uribe, E., Vega-Galvez, Di Scala, K., Oyanadel, R., Saavedra Torrico, J., & Miranda, M. (2009). Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): application of Weibull distribution. *Food and Bioprocess Technology*, 4(8), 1349—1356. <http://doi.org/10.1007/s11947-009-0230-y>.

Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sainz, C., Fito, P., & Andrés, A. (2008). Effect of air-drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, 85(1), 42—50. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.032>.

Wu, X., Beecher, G. R., Holden, J. M., Haytowitz, D. B., Gebhardt, S. E., & Prior, R. L. (2006). Concentrations of Anthocyanins in Common Foods in the United States and Estimation of Normal Consumption. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 54, 4069—4075. <http://doi.org/10.1021/jf060300l>.

Wu, X., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). A Novel Infrared Freeze Drying (IRFD) Technology to Lower the Energy Consumption and Keep the Quality of Cordyceps Militaris. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 54, 34—42. <http://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.003>.

Yadav, A. K., & Singh, S. V. (2014). Osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Journal of Food Science Technology*, 51(9), 1654—1673. <http://doi.org/10.1007/s13197-012-0659-2>.