

УДК 664.8.047:536.66

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ВИТРАТИПетрова Ж.О.¹, д.т.н., Слободянюк К.С.², к.т.н., Іванов С.О.³, к.т.н., Граков О.П.⁴¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, головний науковий співробітник, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, ironket@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3416-388X>³Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, старший науковий співробітник, teplover@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2722-7323>⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, Україна, 03057, аспірант, grakovcom@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0743-2431><https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.5>

Представлено комплексні дослідження по визначенню впливу комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів (ягід лохини, *Vaccinium corymbosum* L.) на енергетичні витрати. Досліджено вплив попередньо розроблених гігротермічної та обробки інфрачервоним випромінюванням свіжої лохини на кінетику та зміну швидкості сушіння ягід. Застосування інфрачервоного випромінювання дозволило скоротити загальну тривалість процесу зневоднення в 1,2 рази. Експериментальне визначення теплоємності та теплоти випаровування вологи з попередньо оброблених ягід лохини показало надлишкові витрати енергії на можливий фазовий перехід воскової оболонки ягоди при сушінні та зменшення ефективності сушіння матеріалу при значеннях вологості $W^c \leq 20\%$.

Comprehensive studies are presented to determine the impact of combined drying of colloidal capillary-porous materials (blueberry, *Vaccinium corymbosum* L.) on energy consumption. The effect of pre-developed hygrothermal and infrared treatment of fresh blueberries on the kinetics and change in the drying speed of berries was studied. The use of infrared radiation made it possible to reduce the total duration of the dehydration process by 1.2 times. Experimental determination of heat capacity and heat of evaporation of moisture from pre-processed blueberry showed excess energy consumption for a possible phase transition of the waxy shell of the berry during drying and a decrease in the drying efficiency of the material at moisture values $W^c \leq 20\%$.

Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: лохина, сушіння, віск, гігротермічна обробка, інфрачервоне випромінювання, теплота випаровування, питома теплоємність.

Постановка проблеми. Сушильні процеси є одними з найбільш енергоємних технологічних процесів і, враховуючи високу вартість енергоресурсів, в значній мірі впливають на економічні показники виробництва [1]. В класичному розумінні, сушіння — процес видалення вологи з матеріалу, за якого змінюються структурно-механічні, технологічні та біологічні властивості, викликані зміною форми зв'язку вологи [2]. Відомо, що після зневоднення капілярно-пористі тіла стають крихкими, мало стискаються і легко піддаються переробці в порошкоподібний стан; колоїдні тіла за зміни вмісту вологи значно змінюють свої розміри, але зберігають пластичні або пружні властивості; колоїдні капілярно-пористі тіла мають капілярно-пористу будову, а стінки капілярів – властивості обмежені набуханням колоїдних тіл (ягоди, фрукти, овочі, шкіра, тканини, деревина) [2].

З кожним роком валове виробництво та урожайність ягідних культур в Україні зростає [3]. На сьогоднішній день ягоди лохини вирощуються в усіх регіонах України, де дозволяють природні умови. Загальною площею насадження 2 тис. га і з кожним роком ця площа збільшується. При високій врожайності свіжі ягоди не встигають реалізувати, тому залишки доцільно переробляти за допомогою сушіння до низької кінцевої інтегральної вологості матеріалу 4-8 % з метою отримання натурального ягідного порошку. Останній в подальшому може бути використаний в харчовій, кондитерській та фармацевтичній промисловості.

Ягоди лохини мають короткий термін зберігання. Ця проблема в переважній більшості вирішується тим, що лохину заморожують і в такому стані більш активно відбувається експорт замороженої ягідної продукції

до країн Євросоюзу [4]. Недоліком цього є необхідність в додатковому обладнанні під час транспортування та зберігання.

Усі всесвітньовідомі способи сушіння ягід супроводжуються такими проблемами, як: висока тривалість сушіння, неможливість використання високих температур повітря через ймовірність перегріву та пригорання ягід, втрати вітамінів та біологічно активних речовин, утворення плівки на шкірці з подальшим ускладненням волого-видалення [5].

Таким чином виникає необхідність у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень сушіння ягідної сировини з метою вибору найраціональнішого способу підведення енергії та процесу в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що існуючі дослідження, що іноземними

дослідниками у більшості випадків надається перевага більш енергоємним методам сушіння: вакуумному, сублімаційному та їх комбінуванню між собою або з класичним конвективним сушінням.

Відоме дослідження [6] загальної тривалості зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння та питомого енергоспоживання стосувалося: сушіння нагрітим повітрям, під вакуумом, інфрачервоне сушіння, сублімація, а також комбінування цих методів (принцип поєднання детально представлено в таблиці 1).

Авторами [7] проводилися дослідження загальної тривалості висихання для кожного вищезазначеного методу показали, що сублімація (тривалість 22 год) має найдовшу тривалість зневоднення лохини. Найкращі результати тривалості сушіння показали інфрачервоне, конвективне та вакуумне сушіння 75, 420 та 480 хви-

Таблиця 1. Опис комбінування методів сушіння [6]

N п/п	Назва	Перша стадія сушіння	Друга стадія сушіння
1	Сушіння конвективне2-сублімація (загальна тривалість – 1050 хв)	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 конвективне3-сублімація (загальна тривалість – 960 хв)	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 коективне4-сублімація (загальна тривалість – 900 хв)	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 (загальна тривалість – 785 хв)	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 (загальна тривалість – 670 хв)	Попереднє сушіння з температурою нагрівання 60°C протягом 10 хвилин до вологовмісту матеріалу 35,4%	Сублімація при 20°C до вологовмісту нижче 2,2%
6	Інфрачервоне сушіння15-сублімація (загальна тривалість – 615 хв)	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	Вакумне сушіння2- сублімація (загальна тривалість – 1140 хв)	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	Вакумне сушіння3- сублімація (загальна тривалість – 960 хв)	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	Вакумне сушіння4- сублімація (загальна тривалість – 900 хв)	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%

лин відповідно. Час висихання комбінованим методом інфрачервоне сушіння – сублімація (785, 670 і 615 хв) було самим короткотривалим серед комбінованих методів сушіння [7].

Окрім того, з дослідження [6] 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 пито́ме споживання енергії (МДж/кг води) представлено на рис. 1.

Зі скороченням тривалості сушіння загальне пито́ме споживання енергії зменшується. У 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 в сушіння сублімацією (495,1 МДж/кг води) в порівнянні з іншими методами сушіння [8]. При сублімаційному сушінні базова енергія, необхідна для видалення 1 кг води, майже в сім разів вища, ніж при звичайному конвективному сушінні [6]

Таким чином найраціональнішими методами сушіння ягід лохини залишаються: інфрачервоне, конвективне та вакуумне. Але сушіння інфрачервоним

випромінюванням викликає погіршення якісних характеристик матеріалу, а зневоднення у вакуумі відоме високими витратами енергії. Тому можна припустити, що останні два методи краще використовувати в комбінації з іншими.

В статті дослідниками [5] виконувались дослідження кінетики сушіння чорниці, чорної та червоної смородини при різних способах підведення енергії. Сушіння до досягнення значень рівноважної вологості ягід відбувалося за допомогою: конвективно з природньою циркуляцією сушильного агенту; конвективно з вимушеною циркуляцією сушильного агенту; конвективно з попереднім прокалюванням та вимушеною циркуляцією сушильного агенту; конвективно з інфрачервоним випромінюванням. Результати досліджень [5] показали, що конвективне сушіння з інфрачервоним випромінюванням дозволило зменшити загальну тривалість процесу на 25-42 % і підвищити швидкість зневоднення на 19-38%. Проте дослідниками не повідомлялось яким був тепловий потік інфрачервоного джерела. Також не висвітлено дані по зміні температури всередині ягід протягом всього процесу. Відсутнє обґрунтування вибору температури 70 °С для сушильного агенту.

Раніше виконаний нами теоретичний аналіз показав [9], що більшість існуючих досліджень присвячені енерговитратним методам сушіння, які були реалізовані

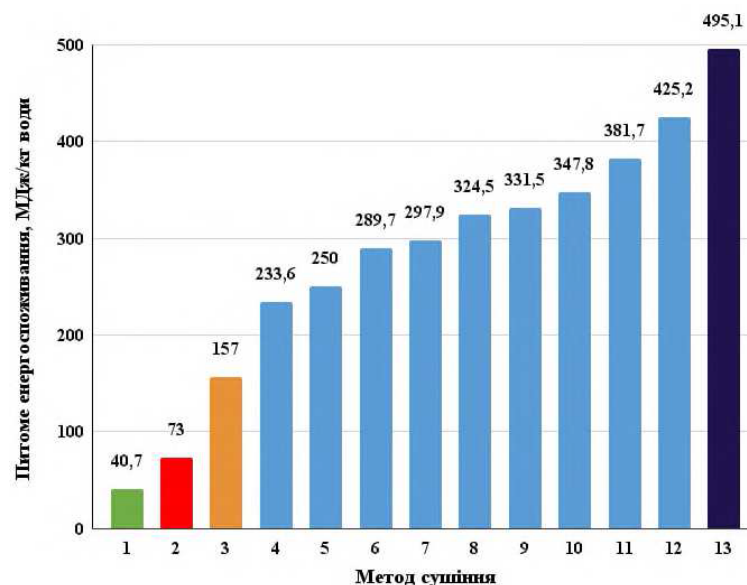


Рис. 1. Пито́ме енергоспоживання зневоднення заморожених ягід лохини залежно від методу сушіння:
 1 – інфрачервоне, 2 – конвективне, 3 – вакуумне, 4 – інфрачервоне15-сублімаційне, 5 – інфрачервоне10-сублімаційне, 6 – конвективне4-сублімаційне, 7 – інфрачервоне5-сублімаційне, 8 – конвективне3-сублімаційне, 9 – вакуумне4-сублімаційне, 10 – вакуумне3-сублімаційне, 11 – конвективне2-сублімаційне, 12 – вакуумне2-сублімаційне, 13 – сублімаційне

в лабораторних умовах, а також є складними для промислового масштабування. Отже, постає питання розробити ефективну підготовку та енергоефективну теплотехнологію сушіння ягід лохини доступними до реалізації в промислових умовах.

Метою роботи є визначити вплив комбінованого сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів (ягід лохини) на енергетичні витрати.

Методи дослідження включають вивчення та аналіз літературних даних існуючих досліджень тепломасообміну під час сушіння ягід лохини відомими методами. Експериментальні дослідження кінетики сушіння ягід лохини проводилися на експериментальному конвективному стенді із вимушеною рециркуляцією теплоносія та інфрачервоними випромінювачами, який розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України у відділі тепломасопереносу в теплотехнологіях. Програмою досліджень передбачено виявлення основних закономірностей сушіння рослинної сировини в широкому діапазоні зміни факторів з проведенням автоматичного збору та обробки інформації про зміну маси, температури зразка з кроком по часу 15 секунд та розрахунків кінетики. Конструкція стенду має: систему ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильні камери (в тому числі з ІЧ-лампами), системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичний збір і обробку інформації про кінетику процесу сушіння матеріалу [10]. Дослідження проводилися в 3 повтореннях.

Теплоту випаровування води зі зразків та їх теплоємність було досліджено за допомогою створеної в Інституті технічної теплофізики НАН України установки синхронного термічного аналізу ДМКИ-01 [11].

В основі методу визначення теплоти випаровування з використанням даної установки лежить припущення

про те, що в ізотермічних умовах теплота, яку підведено до вологого матеріалу, витрачається на випаровування з нього рідини. В установці, яка обладнана двома ідентичними комірками з циліндричними сенсорами теплового потоку, передбачено задавання та підтримання ізотермічного температурного поля, в якому розміщено досліджуваний зразок (рис.2).

Теплота до зразка підводиться кондуктивно, та реєструється сенсорами теплового потоку. Одночасно з цим визначається кількість рідини, яка випарувалась з поверхні матеріалу шляхом реєстрації зміни маси зразка за час проведення досліду. Інтенсифікація процесу сушіння в установці забезпечується постійним видаленням повітря з надлишковою вологою з робочої камери. Теплота випаровування визначається як відношення кількості теплоти, яка підведена до зразка за певний проміжок часу до втрати маси зразком за цей час:

$$\bar{q}_{ij}(T, m, \tau) = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_j} [Q_1(T) - Q_2(T) + Q_{HT}(T)] d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_j)} \quad (1)$$

де: $\bar{q}_{ij}(T, m, \tau)$ – питома теплота випаровування за інтервал часу від початкового моменту i до кінцевого моменту j ; $Q_1(T)$ – тепловий потік через комірку 1; $Q_2(T)$ – тепловий потік через комірку 2; $Q_{HT}(T)$ – неконтрольований тепловий потік; $m(\tau_i) - m(\tau_j)$ – втрата маси зразком за час від τ_i до τ_j

Визначення питомої теплоємності здійснювали за стандартизованим методом покрокового сканування [12] в діапазоні температур від 30 до 95°C. Відповідно до методу, після розміщення зразка відомої маси в робочій комірці та її подальшої герметизації, реалізується покроковий режим підвищення температури. Він полягає

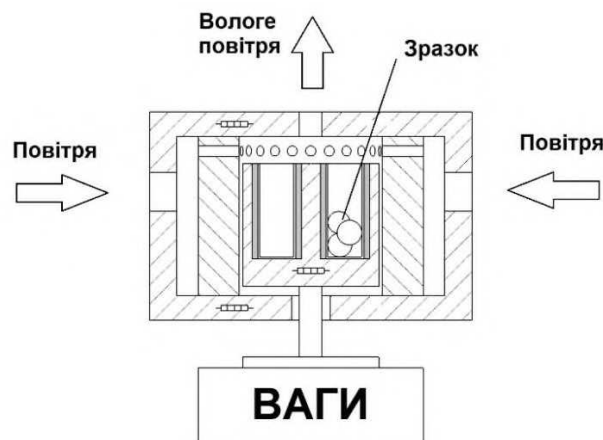


Рис. 2. Принципова схема теплового блоку установки ДМКИ-01

у почерговому підвищенні температури робочої камери теплового блоку на 5 °C та витримуванні зразка в стаціонарних умовах за заданої температури. При цьому реєструється кількість теплоти, що витрачається на нагрівання досліджуваного зразка. Тривалість кожного інтервалу між послідовними підвищеннями температури зразка обумовлена часом встановлення в комірці ізотермічного середовища і для зразків лохини становила 25 хв. Теплоємність матеріалу в заданому інтервалі визначалася як відношення кількості теплоти, яку витрачено на нагрівання зразка до різниці значень початкової та кінцевої температури інтервалу:

$$c = 1/m \cdot \left[\int_{\tau_1}^{\tau_2} \Delta Q(\tau) d\tau / \Delta T + \Delta C_{БАЛ} \right], \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (2)$$

де: m – маса досліджуваного зразка; ΔQ – різниця теплових потоків, що реєструються робочою коміркою та коміркою-референтом за час від τ_1 до τ_2 (тривалість інтервалу); ΔT – різниця значень температури між інтервалами; $\Delta C_{БАЛ}$ – параметр, який враховує неідентичність теплофізичних властивостей робочої комірки і комірки-референта;

Викладення основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Доведено, що споживання лохини (*Vaccinium corymbosum* L.) в раціон харчування дозволяє покращити стан здоров'я людини [6]. Ягода має високий вміст антиоксидантних з'єднань (флавоноїдів і антоціанів) і вітамінів А, В, С і Е, добре відома своїми протипухлинними, протизапальними та протидіабетичними властивостями [6].

Антоціани — це природні пігменти в ягодах, саме червоного, синього і фіолетового кольорів, які широко використовуються як барвники в багатьох продуктах харчування [13].

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 [14]. Отже, найвищий вміст антоціанів у ягодах лохини, але під час переробки вони легко руйнуються [14].

Розмір та маса ягоди, вміст кісточок, наявність шкірки та її властивості – технологічні властивості сировини, які є надважливими характеристиками для сушіння ягід. Ягода лохини складається з шкірки з восковим нальотом та м'якоті.

Всі 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 та тепломасообмінного

процесу в цілому. Іншими словами можна сказати, що хімічні властивості та структура ягідних культур потребують ретельного вивчення і відповідно до цього матеріал має правильно зневоднюватись.

Ягоди, як і вся рослинна сировина, – термолабільний колоїдний капілярно-пористий матеріал, що при обробці сушінням потребує «м'яких» температурних впливів теплоносія. Нами виконано порівняльний аналіз впливу гіротермічної обробки ягід на тривалість зневоднення і інфрачервоного (ІЧ) випромінювання тепловим потоком 3800 Вт/м² протягом 10 хв з одночасним сушінням при режимних параметрах теплоносія (повітря) $t=60$ °C, $v=3$ м/с, $d=10$ г/кг с. п. Початкова маса шару ягід становила 65 г з початковою вологістю $W_n = 85$ %. Отримані графіки кінетики сушіння ягід лохини мають вигляд характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Сушіння зразків виконувалося до досягнення ними середньої (інтегральної) вологості $W_s = 12,65$ %. Застосування ІЧ-випромінювання дозволило скоротити загальну тривалість процесу зневоднення в 1,2 рази (рис. 3, а) [10].

Після проведеного регресійного аналізу графіків залежності $W^c=f(\tau)$ виконувалося диференціювання в програмному забезпеченні Advanced Grapher. Отримано графіки залежності швидкості сушіння $dW/d\tau$, %/хв від середньої вологості матеріалу W^c , % (рис. 3, б).

По мірі заглиблення зони випаровування, при зменшенні середньої вологості матеріалу зростає швидкість сушіння ягід. Найбільшої швидкості сушіння матеріал набуває при зменшенні

$W^c = 50...18$ %. Під час дослідження кінетики сушіння ягід нами були отримані дані зміни температури лохини. Можна припустити, що через зростання внутрішньої температури ягід ≥ 55 °C і внутрішнього тиску відбувається помірне руйнування частини оболонки клітин. Це може дати можливість інтенсивнішому виділенню вологи з матеріалу під час сушіння. Як видно з рис.3, б ягоди лохини оброблені інфрачервоними випромінювачами потужністю 100 Вт ($\tau_n=10$ хв) на початку сушіння з подальшим досушуванням при температурі теплоносія 60 °C характеризуються вищою швидкістю сушіння (крива 2) відносно конвективного сушіння при температурі теплоносія 60 °C попередньо гіротермічно оброблених ягід лохини (крива 1).

На рис. 4 показана залежність питомої приведенної теплоти випаровування вологи з тканин цілих попередньо оброблених ягід лохини від їх відносної вологості для температури сушіння 60 °C і 80 °C. Експериментально показано, що вже на ранніх етапах сушіння спостерігається перевищення виміряних значень тепло-

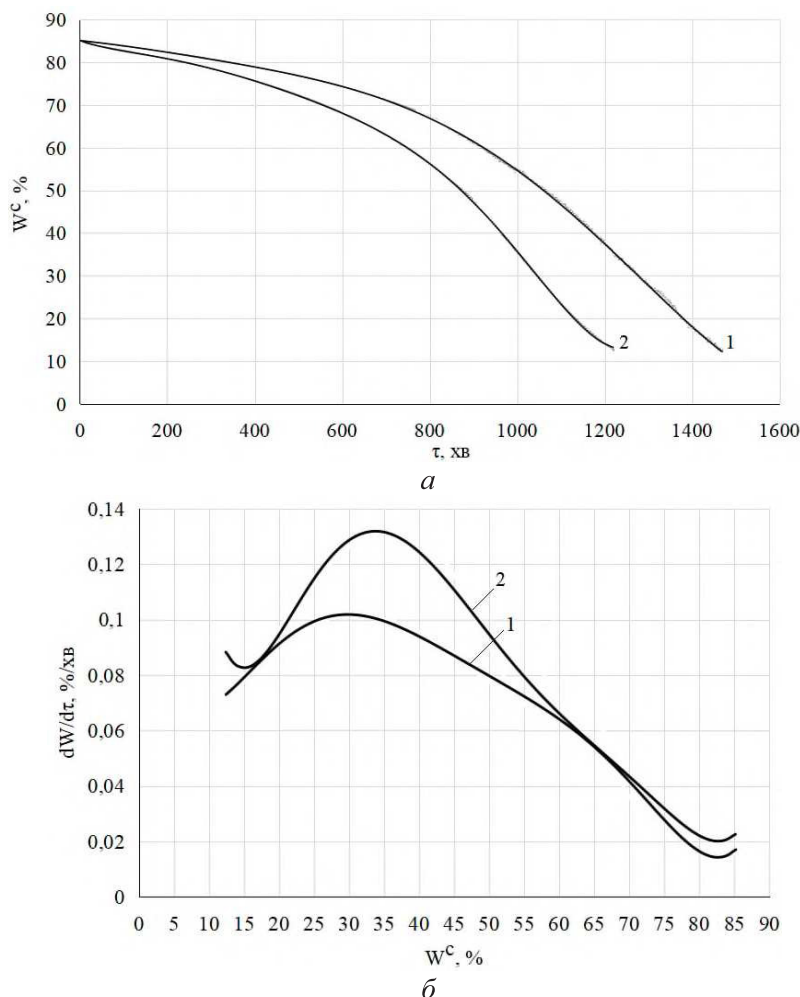


Рис. 3. Кінетика сушіння (а) та зміна швидкості (б) зневоднення ягід лохини в залежності від типу обробки.

Режимні параметри теплоносія: $t = 60^\circ\text{C}$, $v = 3 \text{ м/с}$, $d = 10 \text{ г/кг с.п. 1 шар}$.

- 1 – попередньо гігротермічно оброблені ягоди лохини (загальна тривалість зневоднення $\tau = 1468,15 \text{ хв}$);**
2 – ягоди лохини оброблені інфрачервоними випромінювачами потужністю 100 Вт ($\tau_{\text{п}} = 10 \text{ хв}$) на початку сушіння (загальна тривалість зневоднення $\tau = 1219,35 \text{ хв}$)

ти випаровування рідини над рекомендованими значеннями для чистої води з тенденцією до зростання.

Можна припустити, що це пов'язано із впливом на вимірювану величину розчинених у волозі ягоди органічних сполук, в основному цукрів. Підвищення питомої теплоти випаровування зі зменшення вологості зразка вказує на переважаючий вклад витрати енергії у вивільнення зв'язаної з матеріалом вологи та поступове збільшення концентрації органічних розчинів. Лавиноподібне підвищення теплоти випаровування наприкінці сушіння ($W^c \leq 20\%$) показує, що більшість енергії, яку підводять до зразка, витрачається на видалення абсорбційно-зв'язаної вологи.

Питома теплоємність лохини, як показано на рис. 5 в основному залежить від вмісту в ній рідини, що типово для вологих капілярно-пористих матеріалів. Проте, для низьких значень вологості, (27%, 13% та 4%) спостерігаються аномалії у вигляді пікового підвищення ефективної теплоємності для температури $55 \dots 60^\circ\text{C}$. Автори [15] припускали, що таке підвищення теплоємності пов'язане з фазовим переходом захисної воскової плівки, яка запобігає висиханню ягоди в природному середовищі.

Попередньо нами досліджувався вплив ІЧ обробки на кількість воскового нальоту на ягодах лохини. Було встановлено, що ІЧ обробка стимулює процес руйнування воскового нальоту в подальшому під час сушіння.

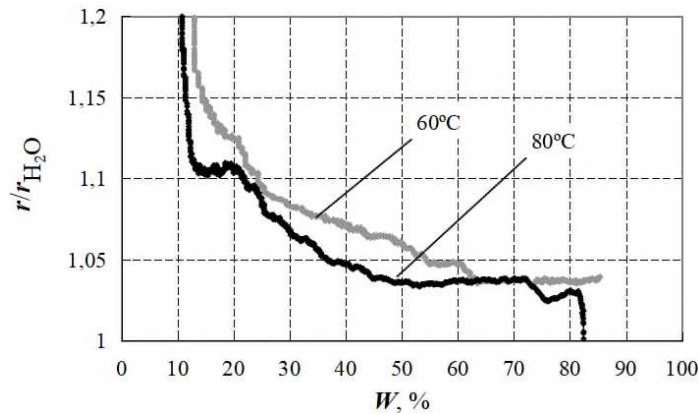


Рис. 4. Залежність питомої теплоти випаровування води з оброблених інфрачервоним випромінюванням ягід лохини від їх відносної вологості під час сушіння при різних температурах (швидкість повітря 0,8 см/с, вологовміст 8 г/кг сухого повітря)

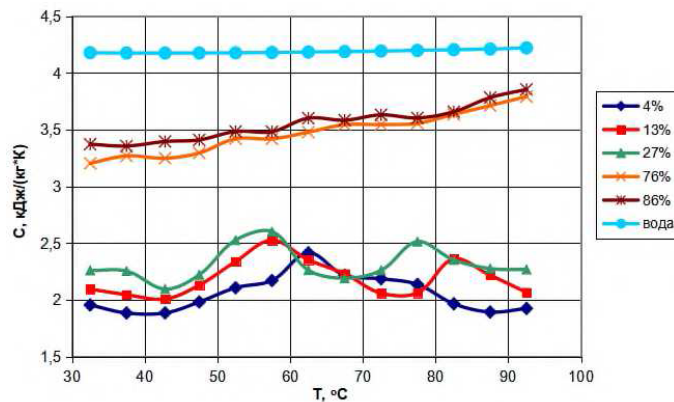


Рис. 5. Залежність теплоємності оброблених інфрачервоним випромінюванням ягід лохини від температури для зразків різної вологості

Отримані експериментальні дані з теплоємності та теплоти випаровування води з попередньо оброблених ягід лохини можна використати для розрахунку критеріїв оптимізації процесу сушіння та вибору на їх основі найбільш енергоефективного режиму сушіння з декількома температурними зонами у зонних сушарках.

Висновки

Аналіз існуючих літературних джерел показав, що переробка ягід лохини методом сушіння не достатньо проводилася в Україні. Через відсутність наукових даних є актуальними дослідження кінетики сушіння ягід лохини методом конвективного зневоднення, а також визначення енергетичних витрат під час переробки.

Застосування обробки інфрачервоним випромінюванням 3800 Вт/м² з одночасним конвективним сушінням свіжих ягід лохини дозволило скоротити загальну тривалість зневоднення в 1,2 рази відносно гіротермічної обробки. Найбільшої швидкості сушіння матеріал набуває при зменшенні $W^c = 50 \dots 18 \%$.

Експериментальне визначення теплоємності та теплоти випаровування води з попередньо оброблених ягід лохини показало надлишкові витрати енергії, а також на динаміку зміни ефективності сушіння матеріалу при значеннях вологості $W^c \leq 20\%$. Отримані дані можна використати для оптимізації енерговитрат на процес сушіння при застосуванні багатоступінчастої зонної сушки.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Погожих М.І., & Пак А.О.* (2015). Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини. Харків: ХДУХТ.
2. *Гайвась Б.* Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів / Б. Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – Вип. 12. – С. 9–37.

3. *Балан А.* (2019). Сучасні знання — драйвер розвитку ягідного сектору України. *Ягідник*, 4, 10.
4. *Галат, Л. М.* (2021). Експортний потенціал та проблеми розвитку галузі ягідництва України. *Агросвіт*, 1-2, 46-55.
5. *Акуліч А.В., Гостіницікова Л.А.* Исследование кинетики процесса сушки ягодного сырья при различных способах энергоподвода. *Харчова наука і технологія*, 2 (23), 2013. С. 112-115.
6. *Tamás, A.* (2021). Effect of different drying techniques on the drying time and energy of blueberry. *Analecta Technica Szegedinensia*, 15(1), 23-30.
7. *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.
8. *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.
9. *Петрова Ж.О., Слободянюк К.С., Граков О.П.* Теоретичний аналіз сучасного стану переробки ягід логістики відомими методами сушіння. *Наукові праці НУХТ* 2022. Том 28, №3. С.123-143. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-13.
10. *Petrova Zh., Slobodianiuk K., Grakov O.* Determination of the influence of pre-preparation of blueberries (*Vaccinium Corymbosum* L.) on the total duration of drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №2(122). 2023. P. 50-69.
11. *S. Ivanov, O. Dekusha, L. Vorobiov, L. Dekusha and Z. Burova*, "The Synchronous Thermal Analysis Cyber-Physical System for the Wet Materials Properties Study," 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 197-200, doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929763.
12. *ДСТУ ISO 11357-4:2010.* Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності.
13. *Bridle, P., & Timberlake, C.F.* (1997). Anthocyanins as natural food colours-selected aspects. *Food Chemistry*, 58, 103-109.
14. *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.
15. *Paulo Díaz, Olivia Henríquez, Javier Enrione, Silvia Matiacevich.* Thermal transitions of pulp and cuticle of blueberries, *Thermochimica Acta*, Volume 525, Issues 1–2, 2011, Pages 56-61, ISSN 0040-6031

INFLUENCE OF COMBINED DRYING OF COLLOID CAPILLARY-POROUS MATERIALS ON ENERGY EXPENDITURES

Petrova Zh.O.¹, Dr. Sci. (Engin.),
Slobodianiuk K.S.², PhD (Engin.),
Ivanov S.O.³, PhD (Engin.), Grakov O.P.⁴, PhD

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Chief Researcher, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, ironket@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3416-388X>*

³*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, teplomer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2722-7323>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD-student, grakovcom@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0743-2431>*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.5>

One of the berry crops that has recently gained popularity among consumers is blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). The berry is a powerful antioxidant, and besides, it contains fructose in its composition, which automatically refers it to the products of the diabetic diet. Therefore, blueberries become an interesting colloidal capillary-porous drying object. Wax on the skin of berries performs a protective function in the process of ripening, harvesting and transportation, but is a negative factor for the implementation of technological processing by artificial dehydration. The latter causes significant energy costs for the processing process. Therefore, the aim of the work is to determine the effect of combined drying of blueberry on energy consumption.

Experimental studies of the drying kinetics of blueberry were carried out on an experimental convective stand with forced recirculation of the coolant and infrared emitters, which was developed in IET of NAS of Ukraine. The effect of pre-developed hygrothermal and infrared treatment of fresh blueberries on the kinetics and change in the drying speed of berries was investigated. The use of infrared radiation made it possible to reduce the total duration of the dehydration process by 1.2 times.

The heat of evaporation of moisture from the samples and their heat capacity were investigated using the method created in IET of NAS of Ukraine installations of synchronous thermal analysis DMKI-01, which is intended for the study of colloidal capillary-porous materials. Determination of specific heat capacity was carried out according to the standardized method of step-by-step scanning DSTU ISO 11357-4:2010 in the temperature range from 30 to 95°C.

Experimental determination of heat capacity and heat of evaporation of moisture from pre-processed blueberry showed excess energy consumption for a possible phase transition of the waxy shell of the berry during drying and a decrease in the drying efficiency of the material at moisture values $W^e \leq 20\%$.

References 14, figure 5, table 1.

Keywords: blueberry, drying, wax, hygrothermal treatment, infrared radiation, heat of evaporation, specific heat capacity.

1. *Pohozhykh M.I., & Pak A.O.* (2015). Enerhoefektyvni sposoby pererobky kharchovoi syrovyny: sushinnia plodovo-yahidnoi syrovyny [Energy-efficient methods of processing food raw materials: drying fruit and berry raw materials]. Kharkiv: KhDUKhT. (in Ukr.)

2. *Haivas B.* Matematychnе modeliuвання konvek- tyvnoho sushinnia materialiv z urakhuvanniam mekhanotermodyfuziinykh protsesiv [Mathematical modeling of convective drying of materials taking into account mechano-thermo diffusion processes]. Fizyko-matematychnе modeliuвання ta informatsiini tekhnolohii.– 2010. – Vyp. 12. – S. 9–37. (in Ukr.)

3. *Balan A.* (2019). Suchasni znannia — draiver rozvytku yahidnoho sektoru Ukrainy [Modern knowledge is a driver of the development of the berry sector of Ukraine]. Yahidnyk, 4, 10. (in Ukr.)

4. *Halat, L. M.* (2021). Eksportnyi potentsial ta problemy rozvytku haluzi yahidnytstva Ukrainy [Export potential and problems of development of the berry growing industry of Ukraine]. Ahrosvit, 1-2, 46-55. (in Ukr.)

5. *Akulich A.V., Hostinshchikova L.A.* Yssledovanye kynytyky protsessu sushky yahodnoho syria pry razlychnykh sposobakh enerhopodvoda [Study of the kinetics of the drying process of berry raw materials with various methods of energy supply]. Kharchova nauka i tekhnolohiia, 2 (23), 2013. S. 112-115. (in Rus.)

6. *Tamás, A.* (2021). Effect of different drying techniques on the drying time and energy of blueberry. Analecta Technica Szegedinensia, 15(1), 23-30.

7. 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.
8. 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.
9. Petrova Zh.O., Slobodianiuk K.S., Hrakov O.P. Teoretychnyi analiz suchasnoho stanu pererobky yahid lokhyny vidomymy metodamy sushinnia [Theoretical analysis of the current state of blueberry processing using known drying methods]. *Naukovi pratsi NUKhT* 2022. Tom 28, No3. S.123-143. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-13. (in Ukr.)
10. Petrova Zh., Slobodianiuk K., Grakov O. Determination of the influence of pre-preparation of blueberries (*Vaccinium Corymbosum* L.) on the total duration of drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №2(122). 2023. P. 50-69.
11. S. Ivanov, O. Dekusha, L. Vorobiov, L. Dekusha and Z. Burova "The Synchronous Thermal Analysis Cyber-Physical System for the Wet Materials Properties Study," 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 197-200, doi: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929763.
12. DSTU ISO 11357-4:2010. Plastmasy. Dyferentsialna skanuvalna kalorymetriia. Chastyna 4. Vyznachennia pytomoi teploiemnosti. (in Ukr.)
13. Bridle, P., & Timberlake, C.F. (1997). Anthocyanins as natural food colours-selected aspects. *Food Chemistry*, 58, 103-109.
14. 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.
15. Paulo Díaz, Olivia Henríquez, Javier Enrione, Silvia Matiacevich Thermal transitions of pulp and cuticle of blueberries, *Thermochimica Acta*, Volume 525, Issues 1–2, 2011, Pages 56-61, ISSN 0040-6031

Отримано 12.04.2023

Received 12.04.2023