УДК 664.8.047

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/14>**Шанар Р.О.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Сорокова Н.М.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусарова О.В.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

РЕСУРСО- Й ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ПЕРЕРОБЛЕННІ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ НА СУШЕНІ ПРОДУКТИ

У статті проаналізовано актуальність і перспективність перероблення термолабільних рослинних матеріалів на сушені продукти як одного з альтернативних варіантів свіжим фруктам й овочам. Відзначено, що сушіння, як метод консервування, характеризується високою енергоємністю й підвищеними вимогами до якості й безпечності кінцевого продукту. Представлено узагальнення кінетичних закономірностей вологообміну у вигляді температурних кривих, кривих сушіння та швидкості сушіння. Показано, що процес видалення вологи відбувається в періоді падаючої швидкості впродовж усього зневоднення. Обґрунтовано енергозберігаючі ступеневі режими сушіння термолабільних фруктів і овочів, відповідно до яких температура матеріалу впродовж зневоднення не перевищує гранично допустиму величину й забезпечує високий ступінь збереження природних компонентів, інтенсифікацію теплома-сообмінних процесів, скорочення енерговитрат до 25%. Представлено екологічно безпечну теплотехнологію перероблення фруктів й овочів на сухофрукти, чипси, фруктові-овочеві порошки. Для сушіння використовують створені конвективні зонні сушильні установки тунельного та стрічкового типу, а також теплонасосні, з низькими витратами теплоти. Завдяки автономності теплових зон, інтенсивність теплового потоку на матеріал розподіляється відповідно до ступеневого режиму. Підкреслено, що сушіння термолабільних матеріалів здійснюється в середовищі чистого гарячого повітря без використання інертних і хімічно синтезованих речовин.

Контроль якісних показників проводять на кожному етапі виробництва. Гарантовано дотримання режимних тепловолісних параметрів й екологічної чистоти технологічного процесу. Надано напрями використання сушених продуктів. Промислове перероблення фруктів і овочів сприятиме збільшенню натуральних екологічно чистих сушених продуктів на національному й міжнародному ринках.

Ключові слова: термолабільні рослинні матеріали, ступеневе зневоднення, енергозберігаючі режими, інтенсифікація процесу, сушені продукти.

Постановка проблеми. Одним з найважливіших чинників, що впливає на стан здоров'я людей, є харчування. Забезпечення населення високоякісними біологічно повноцінними продуктами має велике медичне, продовольче, економічне значення. Невід'ємною складовою частиною харчування й незамінним джерелом нативних вітамінів, амінокислот, мікроелементів, легкозасвоюваних вуглеводів, органічних кислот, фітонцидів, біологічно активних й інших речовин є фрукти і овочі. Альтернативним варіантом свіжим фруктам й овочам у зимово-весняний період року є перероблення врожаю на соки, пюре, пасти, джеми, заморожені та сушені продукти. Сегмент сушених фруктів й овочів представлений сухофруктами,

чипсами, порошкоподібною формою. Вони мають певні переваги порівняно з іншими методами консервування: по-перше, малі транспортні витрати й невеликі площі складських приміщень, по-друге, тривалий термін зберігання й доступність споживачеві цілорічно; водночас розширюється географія ринків реалізації сушених продуктів, у тому числі й міжнародних [1; 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз науково-технічних джерел свідчить, що у світі питома вага процесів сушіння в сумарному енергобалансі й обсяг продукції, що зневоднюється, постійно збільшуються. В умовах зростання вимог до якості кінцевого продукту й економічності процесу сушіння для забезпечення

збереження цінних нативних складових термолабільних рослинних матеріалів під час зневоднення технології, методи та сушильні установки постійно вдосконалюють й оновлюють сучасними засобами керування процесом, контролю виробництва та пристроями для автоматизації [1; 3].

Світове споживання сухофруктів, які є продуктом здорового харчування, стабільно зростає. Незважаючи на те, що Україна має сприятливі кліматичні умови та величезний потенціал вирощування сільськогосподарських культур, на вітчизняному ринку присутні сушені продукти майже з двадцяти країн світу [4], і лише незначна частина (до 15%) представлена власними виробниками. Якщо проаналізувати ситуацію на прикладі яблук, то, за даними Інвестиційного центру Продовольчої й сільськогосподарської організації ООН (ФАО), Україна, яка має суттєвий надлишок яблук на внутрішньому ринку, практично не виробляє, а отже, і не експортує сушеної продукції, тоді як, наприклад, чилійські аграрії, які є найбільшими світовими експортерами, заробляють 32 млн доларів США на рік за рахунок експорту сушених яблук [5]. У зв'язку з цим розвиток перероблення фруктів і овочів є актуальним і перспективним для забезпечення власних потреб і експортування.

З огляду на сучасний стан енергетичної галузі нашої країни й високу енергоемність термічних процесів, пошук резервів, за рахунок яких можна досягти збільшення обсягу сушеної продукції та зниження енерговитрат на її сушіння, є важливим для практичної реалізації концепції розвитку аграрного сектору [2; 6]. Для раціонального використання природних ресурсів шляхом сушіння є всі передумови: висока врожайність фруктових і овочевих культур, енергоефективні технології й сушильне обладнання, зокрема розроблені Інститутом технічної теплофізики Національної академії наук України (далі – Інститут).

Постановка завдання. Враховуючи доцільність впровадження сучасних технологій перероблення фруктів і овочів на сушені продукти, узагальнюючи результати власних теоретичних й експериментальних досліджень, обґрунтувати енергоефективні режими конвективного сушіння й ресурсоенергозберігаючи, екологічно безпечну теплотехнологію виробництва, надати напрями використання сушених продуктів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ефективність процесу сушіння об'єднує три складові частини: інтенсивність, економічність,

якість. За зневоднення фруктів і овочів вимоги до кінцевого продукту посилюються його безпечністю під час вживання й подальшого використання в харчових продуктах. Сушіння – складний і енергоємний процес, який визначається тісним взаємозв'язком тепломасообмінних закономірностей і технологічних властивостей об'єктів зневоднення [7; 8].

Є низка методів скорочення енерговитрат процесу сушіння. Під час зневоднення високовологих фруктів і овочів, що мають складну колоїдну капілярно-пористу структуру, процес ускладнюється наявністю термолабільних складових – вуглеводів, пектинових і каротинових речовин, органічних кислот, вітамінів, мікроелементів, біологічно активних сполук тощо. Під час сушіння змінюються фізичні, біохімічні, структурно-механічні та інші природні властивості об'єктів зневоднення, відбувається перетворення складових інгредієнтів, у тому числі й негативні. Характер і глибина змін нерозривно пов'язані з тепловим впливом на їхню природну систему та значною мірою залежить від величини гранично допустимої температури й тривалості процесу. Звідси витікає, що кінетика нагрівання під час зневоднення термолабільних фруктів і овочів є більш важливою за кінетику видалення вологи. Під час визначення допустимої температури необхідно враховувати ще й час перебування матеріалу в середовищі певної температури [1; 9].

Узагальнюючи результати експериментальних досліджень на підставі розробленої математичної моделі, визначено оптимальні параметри зневоднення, відповідно до яких температура матеріалу не перевищує максимально допустиму величину та забезпечує збереження цінних компонентів. Уникнення перевищення температури матеріалу понад гранично допустиме значення забезпечується таким чином:

- сушінням в режимах конвективного ступеневого зневоднення;
- сушінням конденсаційним способом з використанням теплового насоса;
- сушінням в режимі конвективно-конденсаційного зневоднення;
- поєднанням ІК і конденсаційного сушіння [10].

Використання наведених способів дає змогу заощадити теплові витрати (від 10 до 25%).

Приклад одного зі способів шляхом використання ступеневих режимів конвективного зневоднення у вигляді кривих кінетики сушіння,

швидкості сушіння (а) й температурних кривих (б) надано на рис. 1. Аналіз графічного матеріалу показує, що характер кривих властивий колоїдним капілярно-пористим матеріалам. Процес видалення вологи в зазначеному діапазоні параметрів проведення процесу відбувається в періоді спадної швидкості сушіння.

Для порівняльного аналізу наведено криві сушіння, одержані в режимі одноступеневого зневоднення за 110°C (крива 1).

Температура сушильного агента 110°C набагато вища за допустиме значення. Такий режим обрано для того, щоб максимально розширити температурний діапазон експериментальних досліджень. Як видно з температурних кривих, в міру видалення вологи, після досягнення зневоднювальним матеріалом поточної вологості від $W^c = 580$ до 500% температура починає стрімко зростати, наближаючись до безпечної межі, починається потемніння зразків, особливо з боку набігаючого потоку теплоносія, температура матеріалу перевищує граничний рівень, що унеможлиблює його використання. Проте застосування такої температури у випадку ступеневого зневоднення на початковому етапі (криві 2 і 3 відповідно) позитивно впливає на кінетику вологообміну, інтенсифікуючи процес і скорочуючи його тривалість.

Під час зневоднення за ступеневими режимами на початку процесу температура сушильного агента дорівнює 110°C і забезпечує інтенсивне випаровування вологи без погіршення якості зневоднюваної сировини. Через 15 хв температуру теплоносія знижують до 90°C (крива 2), а ще через 20 хв – до 70°C і підтримують на такому рівні до кінця сушіння. За іншим режимом температура теплоносія впродовж 20 хв дорівнює 110°C , далі, безперервно контролюючи температуру матеріалу, знижують до 70°C (крива 3). Режими процесу корегують залежно від виду сировини, ступеня її стиглості, форми, типу сушильного обладнання й навантаження на сушильну поверхню.

Аналіз графічних кривих доводить, що температура матеріалу впродовж сушіння за ступеневими режимами не перевищує гранично допустиму величину. Завдяки підтримуванню температури матеріалу на безпечному рівні виключаються негативні структурно-деформаційні перетворення, перегрівання матеріалу

та руйнування термолабільних речовин зневоднюваних фруктів й овочів. Проведення сушіння у такий спосіб сприяє скороченню тривалості зневоднення, інтенсифікації процесу та зниженню енерговитрат до 25% [1; 11].

За результатами теоретичних досліджень з урахуванням установлених режимів розроблено універсальну ресурсоенергозберігаючу, екологічно безпечну теплотехнологію перероблення фруктів й овочів на сушену продукцію, що здійснюється за трьома напрямками: одержання продуктів з рівноважною з навколишнім середовищем вологістю $W_{\text{рівн}} = 13...22\%$ (сухофрукти), продуктів з низькою залишковою вологістю $W_s \leq 8\%$ (чипси), фруктових порошків. Для сушіння використовують створені зонні конвективні сушильні установки тунельного та стрічкового типу, а також теплонасосні, що характеризуються низькими витратами теплоти. Завдяки автономності теплових зон, інтенсивність теплового потоку на матеріал розподіляється відповідно до ступеневого режиму. Зневоднення проводять у середовищі чистого гарячого повітря без оброблення інертними й хімічно синтезованими речовинами.

На відміну від наявних аналогів, до технологічних процесів яких включено внесення смакових інгредієнтів, ароматизаторів, консервантів здебільшого штучного походження (підсолоджувачі, есенції, лимонна кислота, прянощі тощо) [12–14], за технологією Інституту не передбачено застосування додаткових смакових компонентів, що забезпечує природність і натуральність сушеним продуктам. Поєднання натуральності, функціональності, мікробіологічної чистоти характеризує їхню високу безпечність. Контроль якісних показників проводять на кожному етапі виробництва, гарантуючи дотримання режимних

Рис. 1. Кінетичні криві вологообміну в режимі ступеневого сушіння: а) криві сушіння $W^c = f(\tau)$; криві швидкості сушіння $dW^c/d\tau = f(W^c)$; б) температурні криві $W^c = f(t)$. $V = 1 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря; $g = 6,3 \text{ кг/м}^2$: 1 – 110°C ; 2 – $110...90...70^{\circ}\text{C}$; 3 – $110...70^{\circ}\text{C}$

тепловологісних параметрів й екологічної чистоти технологічного процесу (рис. 2).

Сухофрукти й чипси з фруктів, як продукти здорового харчування, використовують для приготування напоїв, узварів або вживають як самостійні продукти. Коло споживачів представлено ресторанными, освітніми, туристичними, спортивними та іншими закладами. Фруктово-овочеві порошки додають у молочні, кондитерські, борошняні вироби, збагачуючи їх природними складовими, які є альтернативою штучним барвникам, наповнювачам, смаковим компонентам,

що нерідко використовують у виготовленні харчових продуктів (рис. 3) [1; 15].

Порошкоподібна форма розширює сферу використання і, незважаючи на необхідність додаткового технологічного обладнання й додаткових енерговитрат, має попит. З огляду на те що по закінченню сушіння температура матеріалу дорівнює 55...65 °С, для уникнення термопластичності та забезпечення якісного подрібнення й фракціонування висушені продукти детермопластифікують (охладжують). Дослідженнями встановлено, що коли потрібно одержати дрібно-

Рис. 2. Забезпечення якісних показників під час перероблення

Рис. 3. Напрями використання сушених фруктово-овочевих продуктів

дисперсний порошок з фруктів, які мають високий вміст цукру, зокрема з абрикосів, динь, груш тощо, то температурний режим детермопластифікації, диспергування та фракціонування (порівняно з іншими фруктами та овочами, наприклад яблуками, картоплею, буряками, гарбузами) знижується в бік низьких температур і це призводить до суттєвого зростання енергетичної складової частини всього технологічного процесу, а отже, і собівартості, що не завжди виправдовується матеріально. Крім того, для забезпечення стабільності органолептичних показників порошоків зберігати їх необхідно за температури не вище 0°C. Тому сушіння вказаних фруктів економічно доцільніше здійснювати до рівноважної з навколишнім середовищем вологості й реалізовувати як сухофрукти.

Висновки. Базуючись на результатах теоретичних й експериментальних досліджень, обґрунто-

вано енергоефективні ступеневі режими сушіння термолабільних фруктів й овочів. За цими режимами температура матеріалу впродовж зневоднення не перевищує гранично допустиму величину й забезпечує високий ступінь збереження природного складу сировини, інтенсифікацію тепломасообмінних процесів, скорочення енерговитрат до 25%. Представлено ресурсоенергозберігаючу, екологічно безпечну теплотехнологію перероблення фруктів й овочів, наведено напрями використання сушеної фруктово-овочевої продукції.

Промислове перероблення фруктів й овочів сприятиме збереженню природних ресурсів, раціональному використанню вирощеного врожаю, збільшенню вітчизняних конкурентоспроможних натуральних, екологічно чистих сушених продуктів для реалізації на національному й міжнародному ринках.

Список літератури:

1. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ : Сік Груп Україна, 2018. 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.
2. Дьякова Ю.В., Орлова Н.Я. С-вітамінність баклажанових снєків. *Товари і ринки*. 2014. № 1. С. 75–83.
3. Kudra T. Energy Performance of Convective Dryer. *Drying Technology*. 2012. Vol. 30. Issue 11–12. P. 1190–1198. doi.org/10.1080/07373937.2012.690803.
4. Дешево і корисно: як заробляти на сушеній плодово-ягідній продукції. *Агроновости України*. URL: <http://agro-yug.com.ua/archives/20377> (дата звернення: 15.08.2019).
5. Україна могла б непогано заробляти на експорті сушених яблук. *Бізнес-цензор*. URL: <https://www.seeds.org.ua/ukra%D1%97na-mogla-b-nepogano-zaroblyati-na-eksporti-sushenix-yabluk/> (дата звернення: 12.07.2019).
6. Про схвалення Концепції Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1437-2015-%D1%80> (дата звернення: 22.10.2019).
7. Флауменбаум Б.Л., Танчев С.С., Гришин М.А. Основы консервирования пищевых продуктов. Москва : Агропромиздат, 1986. 494 с.
8. Лыков А.В. Теория сушки. Москва : Энергия, 1968. 470 с.
9. Снежкин Ю.Ф., Шапарь Р.А. Анализ факторов повышения эффективности процесса сушки термолабильных материалов. *Промышленная теплотехника*. 2009. Т. 31. № 7. С.110–112.
10. Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів / Ю.Ф. Снежкін та ін. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37. № 6. С. 18–26. doi.org/10.31472/ihe.6.2015.04.
11. Переробка плодовоовочевої сировини на сушену продукцію / Ю.Ф. Снежкін та ін. *Наукові доповіді НАУ*. 2006. № 2 (3). URL: <http://base.dnsgb.com.ua/files/journal/Naukovi-dopovidi-NAU/2006-2/snezhkin.pdf>.
12. A method of preparing apple chips : пат. WO/2010/090620 Китай : МПК A23B 7/005 (2006.01), A23B 7/02 (2006.01), A23L 1/212 (2006.01) ; appl. 04.02.2009; pub. 12.08.2010. International application № PCT/US2009/000740.
13. Method for preparing dehydrated apple : пат. KR 1020150051298 Корея : МПК A23L 1/212, A23L 3/40 ; appl. 02.11.2013 ; pub. 12.05.2015. International application № 1020130132592.
14. Способ производства пищевого продукта из свеклы : пат. 2484668 Российская Федерация : МПК9 A23L 1/214. № 2012136364/10 ; заявл. 27.08.2012 ; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. 4 с.
15. Досвід використання натуральних порошоків з рослинної сировини у молочних продуктах / Ю.Ф. Снежкін та ін. *Промышленная теплотехника*. 2002. Т. 24. № 4. С. 57–59.

Shapar R.O., Sorokova N.M., Husarova O.V. RESOURCES AND ENERGY SAVINGS IN THE PROCESSING OF THERMOLABILE PLANT MATERIALS FOR THE DRIED PRODUCTS

The article analyzes the relevance and promising of processing thermolabile plant materials into dried foods, as one of the alternative options for fresh fruits and vegetables. It is noted that drying, as a method of conservation, is characterized by high energy intensity and increased requirements for the quality and safety of the final product. The generalization of the kinetic patterns of moisture exchange by temperature curves, drying

curves and drying rate are presented. The generalization of kinetic regularities of moisture exchange in the form of temperature curves, drying curves and drying speed are presented. The article shows that the process of moisture removal takes place during a period of falling velocity throughout the dehydration. Energy-saving step modes of drying thermally labile fruits and vegetables are substantiated. According to the developed modes, the material temperature during dehydration does not exceed the maximum value and provides a high degree of conservation of natural components, intensification of heat and mass transfer processes, reduction of energy consumption of the process up to 25%. Ecologically safe heat technology of processing fruits and vegetables into dried fruits, chips, fruit and vegetable powders is presented. For drying are using the created convective zone drying installations of the tunnel and tape type and also heat pump with low heat consumption. Due to the autonomy of the thermal zones, the heat flux intensity of the material is distributed according to the step mode. It was emphasized that the drying of thermolabile materials is carried out in an environment of pure hot air without the use of inert and chemically synthesized substances. Quality control is carried out at each stage of production. The observance of mode thermal and humidity parameters and ecological purity of the technological process are guaranteed. Directions for using dried products are provided. The industrial processing of fruits and vegetables will help to increase natural organic dried products in national and international markets.

Key words: *thermolabile plant materials, step dehydration, energy-saving modes, intensification of process, dried products.*