

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ КОНВЕКТИВНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ПІД ЧАС ОДЕРЖАННЯ СУШЕНИХ ПРОДУКТІВ ІЗ КОРЕНЕПЛОДІВ БАТАТУ (*IPOMOEA BATATAS L.*)

Шапар Р. О., Гусарова О. В.

### ВСТУП

У світі зростає популярність та попит на батат (солодку картоплю), і Україна теж не стала винятком. Кліматичні умови нашої країни сприятливі для вирощування коренеплодів батату, але поки що вирощують його у невеликих фермерських господарствах та індивідуальних присадибних ділянках. Коренеплоди батату погано зберігаються, тому виникає необхідність їх переробляти, зокрема на сушені продукти, які мають низку переваг порівняно з іншими, такими як свіжа, консервована продукція, пюре, соки, соуси тощо.

Батат (*Ipomoea batatas L.*) – одна з найважливіших продовольчих культур повсякденного харчування у країнах тропічного і субтропічного клімату. Продукти харчування з батату займають сьоме місце після продуктів з пшениці, рису, кукурудзи, картоплі, ячменю і маніоки. Основна частина батату, а це майже 80% світового врожаю, культивується у Китаї. Лідерство з вирощування батату на європейському континенті належить Португалії та Іспанії<sup>1, 2, 3</sup>. Використанню та переробці підлягають всі частини батату: бульби, лоза, листя. Останні переважно застосовують як корм для тварин.

Коренеплоди, завдяки своїй високій харчовій і біологічній цінності, як вживають у свіжому вигляді при приготуванні

---

<sup>1</sup> Шапар Р. О., Гусарова О.В. Конвективне зневоднення коренеплодів батату при виробництві харчових продуктів : збірник праць XVII Міжн. наук. конф. “Удосконалення процесів і апаратів обладнання харчових та хімічних виробництв”. (Одеса, 3–8 вересня 2018 р.). Одеса. 2018. С. 58–61.

<sup>2</sup> *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2018. URL: <http://www.faostat.fao.org>. (дата звернення 15.05.2018).

<sup>3</sup> *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470958346>.

різноманітних страв<sup>4</sup>, так і використовують у промисловості для одержання харчових продуктів та виділення цільових компонентів (рис. 1).

Вміст сухих речовин у коренеплодах становить від 20 до 30%, при цьому 60...70% складає крохмаль (табл. 1). Хімічний склад батату коливається залежно від сортових ознак, умов вирощування, ступеня зрілості, зберігання. Забарвлення м'якоті зумовлено наявністю каротиноїдів, антоціанів, поліфенолів і буває білим, кремовим, жовтим, помаранчевим, фіолетовим.



**Рис. 1. Напрями переробки батату<sup>5</sup>**

<sup>4</sup> Bovell-Benjamin A. C. Sweet. Potato: a review of its past, present, and future role in human nutrition. *Advances in Food Nutrition Research*. 2007. Vol. 52, Issue 1. P. 1–59. DOI: [http://doi.org/10.1016/s1043-4526\(06\)52001-7](http://doi.org/10.1016/s1043-4526(06)52001-7).

<sup>5</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

**Середній склад поживних речовин кореня батату (на сиру масу)<sup>6</sup>**

Вода	Білок	Жир	Зола	Харчові волокна	Сахароза	Глюкоза	Фруктоза	Крохмаль	Енергетичн а цінність, ккал
77,28	1,57	0,05	0,99	3,00	2,52	0,96	0,70	12,65	86,0

**Примітка:** енергетична цінність, ккал/кДж – 86,0/360

Характерною особливістю коренеплодів вважають кількісний склад вуглеводів та низький вміст білку і жиру. Поживна цінність батату посилюється наявністю у його складі вітамінів, у т. ч. тіаміну, рибофлавіну, каротиноїдів, фолієвої, аскорбінової та пантотенової кислот, а також фенолів, антоціанів, мінеральних речовин. Серед мінеральних речовин домінує кальцій, залізо, калій, магній<sup>7</sup>. Завдяки такому багатому складу його споживання корисне для здоров'я людини і набуває поширення та популярності далеко за межами країн тропічного і субтропічного клімату, у т. ч. і в нашій країні.

Батат, як і всі матеріали рослинного походження, має високий вміст вологи. Ферментативні, мікробіологічні та біохімічні зміни призводять до псування сировини досить швидко. Забезпечення мікробіологічної стійкості та стабільності органолептичних показників під час зберігання можливе в умовах низьких температур, а це енерго- і фінансово витратний крок.

Сушіння – розповсюджений метод збереження свіжої рослинної сировини. Сегмент сушеного батату на світовому ринку представлений пластівцями, чипсами і так званим борошном – дрібнодисперсним порошком.

Сушену продукцію зручніше транспортувати, вона не потребує великих площ для зберігання і має довготривалий термін зберігання, а тому доступна у будь-яку пору року. До того ж розширюється географія ринків реалізації сушених продуктів. Консервуючий ефект під час сушіння досягається за рахунок зниження природної

<sup>6</sup> Handbook of Vegetables and Vegetable Processing / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470958346>.

<sup>7</sup> Handbook of Vegetables and Vegetable Processing / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470958346>.

вологості та уповільнення процесів розвитку мікрофлори у сушених матеріалах.

### 1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз науково-технічних джерел показує, що при зневодненні батату одержують продукти із рівноважною з навколишнім середовищем вологістю, з низькою залишковою вологістю, що мають консистенцію чипсів, порошкоподібних, використовуючи різні способи сушіння: конвективний, кондуктивний, сублімаційний, ІК-випромінювання, поєднання декількох способів на сушильних установках камерного типу, стрічкових, тунельних, розпилювальних, барабанних, а також сонячно-повітряним способом.

Відповідно до<sup>8</sup> попередньо підготовлений до сушіння батат зневоднюють під вакуумом, але використання такого способу обмежено через складність обслуговування і високу вартість сушильного обладнання.

У країнах із сухим кліматом практикується природне сонячно-повітряне сушіння. Підготовлені до сушіння коренеплоди нарізають, бланшують у киплячій воді та піддають сушінню на сонці до досягнення залишкової вологості 6...10%. Залежно від маси зневоднюваної сировини сушіння триває від 4 годин до 5 діб<sup>9</sup>.

Недоліками сонячно-повітряного сушіння є довготривалість процесу, переривання у нічний час, та у разі погіршення погодних умов – мікробіологічна активність і бактеріологічне обсіменіння. За результатами мікробіологічних аналізів, у сушеному бататі, одержаному в такий спосіб, виявлено 12 видів пліснявих грибів<sup>10</sup>. Існуючі недоліки можна подолати за допомогою сучасних сушарок, що працюють на енергії сонця.

Відомий спосіб – одержання порошку з батату, в основі якого покладено розпилювальне сушіння. До недоліків можна віднести попереднє перетворення коренеплодів на пюреподібну масу,

---

<sup>8</sup> Zhong T., Lima M. The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. *Bioresour. Technol.* 2003. 87. P. 215–220.

<sup>9</sup> Silayo, V.G.K., Laswai, H.S., Mkuchu, J., Mpagalile, J.J. Effect of sun-drying on some quality characteristics of sweet potato chips. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development.* 2003. 3 (2). URL: <https://www.ajol.info/index.php/ajfand/article/view/19143>.

<sup>10</sup> Okungbowa FI, Osagie M. Mycoflora of sun-dried sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) slices in Benn City, Nigeria. *African Journal of Biotechnology.* 2009. 8 (14). P. 3326–3331.

внесення мальтодекстринів, чим порушується натуральність кінцевого продукту, а також значні енерговитрати процесу, крупногабаритність розпилювальних сушарок<sup>11</sup>.

Існує спосіб виробництва харчових спіралеподібних чипсів з коренеплодів батату<sup>12</sup>, що складається з підготовки сировини, нарізання коренеплодів спіраллю, просушування, обсмаження в олії, охолодження і пакування. Недоліками даного способу є підвищена калорійність чипсів, наявність холестеринових і канцерогенних речовин внаслідок обсмаження, що негативно позначається на якості кінцевого продукту.

Відповідно до<sup>13</sup> для одержання чипсів підготовлених до зневоднення коренеплід батату нарізають та занурюють, витримують у екстракті зеленого чаю і піддають сушінню. Обробка сировини у розчині чаю потребує додаткового обладнання з підготовки екстракту зеленого чаю, до того ж чипси втрачають свій природний смак, а витрати на виробництво і собівартість зростають.

Автори<sup>14</sup> провели дослідження щодо впливу попередньої обробки шматочків коренеплодів батату у киплячій воді та в атмосфері пари перед сушінням на якісні характеристики висушеного продукту. Сушіння здійснювали у середовищі гарячого повітря за температури 70 °С. Результати досліджень свідчать про доцільність застосування термовологообробки під час виробництва сушеного батату.

Із вищесказаного витікає, що основними вимогами, які пред'являються до сушіння, є контроль параметрів процесу, інтенсивність та забезпечення максимально повного збереження природних властивостей коренеплодів батату при суттєвому скороченні тривалості зневоднення та зниженні енерговитрат.

---

<sup>11</sup> Handbook of Vegetables and Vegetable Processing / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. DOI: <http://doi.org/10.1002/9780470958346>.

<sup>12</sup> Способ производства пищевых спиралевидных чипсов из клубней батата: пат. 0002631393 Российская Федерация: МПК № 2017100171 ; заявл. 09.01.2017; опубл. 21.09.2017. Бюл. № 27.

<sup>13</sup> Method for producing health sweet potato chips: pat. No. CN106901277. China: № 102017000296117; appl. 28.04.2017; pub. 30.06.2017.

<sup>14</sup> Bui My Trang, Son Young Lan, Ji Hyun Park, Hyun Wook Jang, Kyung Mi Kim, Yong Sik Cho, Young Hwang, Ha Yun Kim. The Effects of Pretreatment Methods on Quality Characteristic of Hot Air-dried Sweet Potato Slices. *Food Engineering Progress*. 2020. Vol. 24. No. 3. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.13050/foodengprog.2020.24.3.164>.

**Мета роботи** полягає у дослідженні процесу конвективного зневоднення попередньо оброблених коренеплодів та пошуку шляхів інтенсифікації процесу для скорочення тривалості сушіння, зниження теплових витрат та забезпечення максимально повного збереження природних властивостей батату і конкурентоспроможності сушеного батату на світовому ринку.

Для досягнення мети були поставлені **наступні завдання**:

- визначити оптимальні умови тепловологої обробки;
- встановити кінетичні закономірності процесу сушіння;
- розробити енергоефективні режими сушіння коренеплодів;
- узагальнити вологообмін під час конвективного зневоднення батату.

## **2. Об'єкти, обладнання та методи досліджень**

Дослідження проводяться у рамках Меморандуму про співробітництво з Інститутом технологій ГФС м. Ханой.

В якості об'єкту дослідження використано коренеплоди батату помаранчевого кольору як одного з основних видів сировини для переробної промисловості В'єтнаму і виробництва продуктів харчування. Помаранчевий колір свідчить про наявність у складі батату каротиноїдів. Відповідно до<sup>15</sup> вміст цього вітаміну коливається у діапазоні від 9,1 до 9,4 мг/100 г.

Вивчення кінетики процесу конвективного сушіння проводили на експериментальному стенді з системою автоматичного збору та обробки інформації до залишкової вологості матеріалу 6...8% в діапазоні температур сушильного агента від 60 до 100 °С, швидкості руху від 1,0 до 3,0 м/с, вологовмісті 10 г/кг сухого повітря. Зразки нарізали пластинками завтовшки 3...4 мм та брусками розміром 5×5×50 мм. За отриманими даними побудовано криві кінетики сушіння  $W^{\circ} = f(\tau)$  і кінетики швидкості сушіння  $dW^{\circ}/d\tau = f(W)$ .

Величину початкової, поточної і залишкової вологості зневоднюваного матеріалу визначали у абсолютних одиницях за ДСТУ 7804:2015. Абсолютна вологість  $W^{\circ}$  – це процентний вміст вологи до абсолютно сухої маси матеріалу, яку визначали за формулою (1):

---

<sup>15</sup> Handbook of Vegetables and Vegetable Processing / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470958346>.

$$W^c = \frac{G - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $G_{a.c.}$  – абсолютно суха маса зразка, г.

Абсолютно суху масу зразка визначали за формулою (2):

$$G_{a.c.} = G_k - \frac{G_k \cdot W_k}{100}, \quad (2)$$

де  $G_k$  – маса зразка після висушування на стенді, г;  $W_k$  – залишкова (кінцева) вологість зразка, %.

Для одержання порошкоподібної форми висушений матеріал детермопластифікували (охолоджували), диспергували на мікротлині 8-ММ і дезінтеграторній установці ДЕЗІ та фракціонували за допомогою комплекту сит з відділенням дрібнодисперсної фракції порошку з розміром часточок менше 250 мкм.

### **3. Дослідження процесів тепловологої обробки та конвективного зневоднення коренеплодів батату**

Коренеплоди батату, як природний матеріал і об'єкт зневоднення – складна система, їхні масовологообмінні та термодинамічні характеристики залежать від характеру взаємодії вологи з твердим каркасом сировини і є функцією хімічного складу, структури, щільності паренхімних тканин тощо. У процесі сушіння у разі порушення теплових режимів можливі негативні процеси, що призводять до втрати цінних складників вихідного матеріалу. Для збереження природних властивостей сировини необхідний ретельний підхід до визначення способу зневоднення і встановлення теплових режимів з урахуванням гранично-допустимої температури об'єкту зневоднювання.

Вибір енергоефективних режимів сушіння ґрунтується на забезпеченні максимального видалення вологи, мінімальної тривалості процесу за умов досягнення високої якості кінцевого продукту та його безпечності.

Результатами експериментальних досліджень визначено, що інтенсифікації процесу сушіння передуює оптимально обґрунтована тепловолога обробка паренхімних тканин коренеплодів батату. У даному випадку така технологічна операція є обов'язковою, її основна мета полягає у клейстеризації крохмалю і коагуляції білків. Експериментально визначено, що необхідний ефект обробки

залежить від розмірів і форми зневоднюваного матеріалу та досягається за температури матеріалу 80...95 °С з витримкою 50...600 с. Вплив температури та тривалості знаходяться в обернено пропорційній залежності, обробка здійснюється у воді або в атмосфері пари<sup>16, 17</sup>.

Зазначений режим забезпечує сприятливі умови для гідратації крохмальних зерен за рахунок власної вологи, якої у коренеплодах майже у три рази більше, ніж сухих речовин та насиченої пари. Волога проникає всередину крохмального зерна, розсовує міцели, крохмаль набухає, збільшуючи об'єм зернини і клейстеризується<sup>18</sup>. Під час обробки частково змінюється пружність тканин. Для підвищення пружності та стабілізації клітинної структури проводиться охолодження обробленого сировинного матеріалу шляхом промивання у воді. Одночасно з цим із поверхні змивається плівка, утворена залишками зруйнованих крохмальних зернин, які уповільнюють видалення вологи під час сушіння<sup>19</sup>.

Поряд зі специфічним впливом на зміну властивостей паренхімних тканин, проведенням такої обробки досягається збільшення клітинної проникності коренеплодів батату, що у подальшому, під час сушіння, інтенсифікує вологообмін, при цьому забезпечується збереження вітамінного комплексу, стабілізація природного кольору і смакових якостей та інактивація ферментної системи. Повнота інактивації визначається реакцією на наявність найбільш термостійкого ферменту – пероксидази<sup>20</sup>.

---

<sup>16</sup> Шапар Р. О., Гусарова О.В. Конвективне зневоднення коренеплодів батату при виробництві харчових продуктів : збірник праць XVII Міжн. наук. конф. “Удосконалення процесів і апаратів обладнання харчових та хімічних виробництв”. (Одеса, 3–8 вересня 2018 р.). Одеса. 2018. С. 58–61.

<sup>17</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

<sup>18</sup> Волчкова Н.Т., Ионова А.М. и др. Производство продуктов питания из картофеля. *Легкая и пищевая промышленность*. Москва, 1984. С. 192.

<sup>19</sup> Шапар Р. О., Гусарова О.В. Конвективне зневоднення коренеплодів батату при виробництві харчових продуктів : збірник праць XVII Міжн. наук. конф. “Удосконалення процесів і апаратів обладнання харчових та хімічних виробництв”. (Одеса, 3–8 вересня 2018 р.). Одеса. 2018. С. 58–61.

<sup>20</sup> Aliyeva N.F. The identification of the activity of peroxidase in apples and potatoes under normal and saline conditions. *The World of Medicine and Biolog.* 2011. 31 (4). P. 65–67.



Домінуючим параметром, що визначає інтенсивність процесу сушіння, є температура теплоносія. Збільшення її величини приводить до зростання інтенсивності процесу видалення вологи і скорочення теплових витрат сушіння. Отже, з теплотехнічної точки зору, для інтенсифікації зневоднювання температуру теплоносія маємо збільшувати, а з огляду на термолабільність об'єктів сушіння таке підвищення лімітовано.

Ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень, відповідно до закономірностей тепломасопереносу при сушінні розроблено ступеневі режими зневоднення, за якими температура теплоносія на першому етапі процесу підтримується у діапазоні 80...100 °С, а на другому 55...70 °С. Зазначені режими запобігають виникненню незворотних процесів, які здатні призвести до погіршення якості продукту, оскільки температура матеріалу не перевищує 50...60 °С. Сушінням у такий спосіб досягається інтенсифікація процесу та скорочення тривалості теплового впливу на матеріал.

На підставі експериментальних даних побудовано графічні залежності, які показують, що видалення вологи з коренеплодів батату проходить зі спадною швидкістю впродовж усього процесу. На рис. 2 надано порівняльний аналіз результатів кінетики зневоднення одноступеневого режиму за температури теплоносія 60 °С та двоступеневого 80...60 °С.

Аналіз впливу температури теплоносія на кінетику вологообміну при однаковій тривалості тепловологої обробки зразків завтовшки  $\delta = 3...4$  мм (рис. 2, а, криві 1, 2), показує скорочення тривалості процесу на 22% у режимі двоступеневого зневоднення порівняно з одноступеневим.

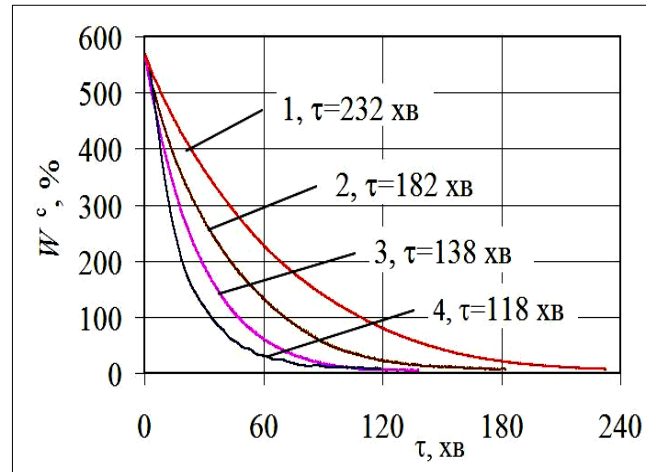
Із збільшенням часу тепловологої обробки зразків батату від 180 до 240 °С в умовах двоступеневого режиму (рис. 2, а, криві 2, 3) спостерігається зменшення тривалості процесу сушіння на 26%.

Залежність геометричної форми та розмірів зразків на кінетику зневоднення (рис. 2, а) показує, що у разі нарізання батату брусочками (крива 4) процес видалення вологи проходить швидше пластинок (крива 3), тривалість процесу скорочується на 15%. Більш інтенсивне сушіння зразків, нарізаних у вигляді брусків, пояснюється меншими поперечними розмірами ніж пластинки<sup>21</sup>.

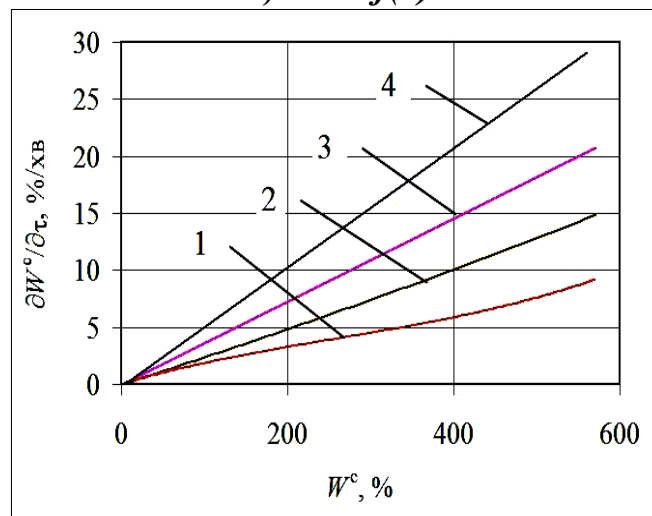
---

<sup>21</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

Із порівняльного аналізу побудованих кривих швидкості сушіння (рис. 2, б) видно, що в межах зазначених параметрів процесу найповільніша швидкість видалення вологи 9,0%/хв. відповідає одноступеневому зневодненню (крива 1), при двоступеневих режимах швидкість зростає до своєї максимальної величини 15,0%/хв, 21,0 та 28,0%/хв (криві 2–4) відповідно.



а)  $W^c = f(\tau)$



б)  $dW^c/d\tau = f(W)$

**Рис. 2. Вплив параметрів сушіння на процес зневоднення,  
 $V = 1,5$  м/с;  $d = 10$  г/кг сух. пов.<sup>22</sup>:**

1 –  $t = 60$  °C,  $\tau_{об} = 180$  с,  $\delta = 3...4$  мм; 2 –  $t = 80...60$  °C,  $\tau_{об} = 180$  с,  
 $\delta = 3...4$  мм; 3 –  $t = 80...60$  °C,  $\tau_{об} = 240$  с,  $\delta = 3...4$  мм; 4 –  $t = 80...60$  °C,  
 $\tau_{об} = 240$  с,  $5 \times 5 \times 50$  мм

<sup>22</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

Температура зневоднюваного матеріалу в режимах одно- і двоступеневого сушіння не перевищує 58 °С. Проте зразки, висушені при температурі теплоносія 60 °С, втрачають природний колір внаслідок довготривалості процесу, через що використання низькотемпературного режиму недоцільне.

#### 4. Вологообмін під час зневоднення коренеплодів батату

Мета розрахунку – визначення загальної тривалості процесу зневоднення коренеплодів батату.

Враховуючи, що процес сушіння є дуже складним і являє собою сукупність пов'язаних одне з одним явищ, які протікають всередині та на поверхні матеріалу, а також всередині сушильної камери, розрахунок тривалості сушіння ускладнений. Для розрахунків використовують наближені методи, які базуються на вивченні загальних закономірностей процесу, що зближує теорію та практику сушіння. Ці методи застосовують для широкого класу матеріалів із різною геометричною формою. Для аналізу основних закономірностей кінетики вологообміну використано метод В. Краснікова.

За отриманими експериментальними кривими зневоднення батату побудовано узагальнену криву кінетики сушіння та представлено її в напівлогарифмічній системі координат  $W^c - N\tau$ , що дозволило визначити критичні вологості в точках перегину  $W^c_{кр}$  (рис. 3), відносні коефіцієнти сушіння  $\chi$  (табл. 2) та залежність (3) для визначення тривалості процесу.

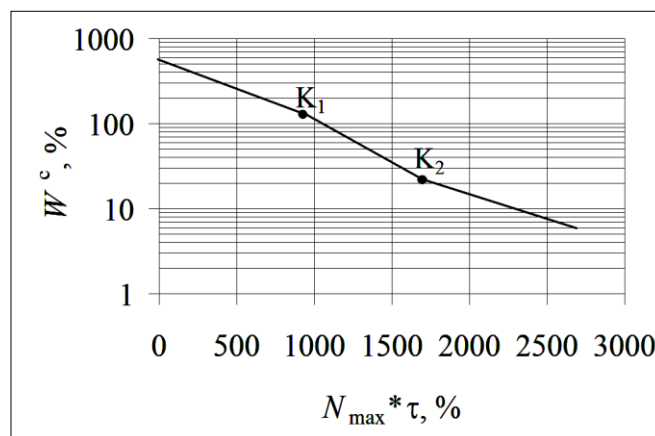


Рис. 3. Узагальнена крива кінетики процесу сушіння батату

Характер побудованої кривої підтвердив протікання процесу сушіння батату у другому періоді падаючої швидкості. Другий період складається з трьох частин, на графіку добре видно точки

перегину ( $K_1, K_2$ ), які відповідають критичним вологостям (рис. 3, табл. 2). Кожна ділянка другого періоду характеризується відносним коефіцієнтом сушіння, що визначається по залежностям  $z^{23}$ . Враховуючи, що сушіння протікає в другому періоді, то для розрахунків було використано максимальну швидкість  $N_{\max}$  замість швидкості  $N$  в першому періоді процесу.

Таблиця 2

**Значення відносних коефіцієнтів сушіння  
крохмалевмісної сировини**

Об'єкт сушіння	Батат	Картопля
Діапазон критичних вологостей, %	550...115	400...315
	115...22	315...120
	22...6	120...24
		24...6
Величина відносних коефіцієнтів сушіння	$\chi_2 = 15 \cdot 10^{-4}$ $\chi_3 = 18 \cdot 10^{-4}$ $\chi_4 = 16 \cdot 10^{-4}$	$\chi_2 = 17 \cdot 10^{-4}$ $\chi_3 = 19 \cdot 10^{-4}$ $\chi_4 = 14 \cdot 10^{-4}$

Для порівняння в таблиці 2 наведено значення величин критичних вологостей та відносних коефіцієнтів сушіння для іншої крохмалевмісної сировини – картоплі. Як бачимо, батат має більшу початкову вологість, але величина відносних коефіцієнтів сушіння батату та картоплі для другого періоду відрізняються несуттєво. Основні закономірності вологообміну крохмалевмісної сировини є загальними і мають подібний характер<sup>24</sup>.

Використовуючи розраховані величини, можна визначити загальну тривалість процесу сушіння коренеплодів батату за зміни режимів зневоднення за залежністю (3):

$$\tau_3 = \frac{1}{N_{\max}} \left( \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{\text{п}}^c}{W_{\text{кр1}}^c} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{\text{кр1}}^c}{W_{\text{кр2}}^c} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{W_{\text{кр2}}^c}{W_{\text{к}}^c} \right), \quad (3)$$

де  $N_{\max}$  – максимальна швидкість сушіння;  $W_{\text{п}}^c, W_{\text{к}}^c$  – початкова та кінцева вологості батату, %;  $W_{\text{кр1}}^c, W_{\text{кр2}}^c$  – перша, друга критичні вологості відповідно, %;  $\chi_2, \chi_3, \chi_4$  – відносні коефіцієнти сушіння.

<sup>23</sup> Красников В.В. Кондуктивная сушка. Москва: Энергия, 1973. 288 с.

<sup>24</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Вологообмін під час зневоднення коренеплодів батату. *Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання* : XVIII Міжн. наук.-пр. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених. (Київ, 21–22 травня 2020). Київ : «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2020. С. 43–46.

Максимальна швидкість  $N_{\max}$  є узагальненою величиною, у якій відображено вплив усіх параметрів, що впливають на швидкість сушіння даного матеріалу.

Відповідно до <sup>25</sup> максимальна швидкість сушіння шару матеріалу  $N_{\max}$  визначається ще з рівняння теплового балансу:

$$G_{\text{пов}} (c_{\text{пов}} - c_{\text{п}} \bar{X}) \cdot (t_2 - t_1) = (c_c - c_p \bar{U}) \rho_0 h \frac{d\theta}{d\tau} - (I_{\text{п}} - I_{\text{р}}) \rho_0 h \frac{d\bar{U}}{d\tau}, \quad (4)$$

де  $G_{\text{пов}}$  – питома витрата сушильного агента (повітря),  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ ;  $c_{\text{пов}}$ ,  $c_{\text{п}}$ ,  $c_c$ ,  $c_p$  – питома теплоємність сухого повітря, пари, сухого матеріалу та рідини відповідно,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\bar{X}$  – середній вологовміст сушильного агента,  $\text{кг}$  вологи/ $\text{кг}$  сухого повітря;  $t_1$ ,  $t_2$  – температура сушильного агента на вході та виході із шару,  $\text{К}$ ;  $\rho_0$  – густина сухої речовини матеріалу,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $h$  – висота шару,  $\text{м}$ ;  $I_{\text{п}}$ ,  $I_{\text{р}}$  – ентальпія пари та рідини,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

$$I_{\text{п}} - I_{\text{р}} = r + c_{\text{п}} (\bar{t} - \bar{\theta}), \quad (5)$$

де  $r$  – питома теплота випаровування,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $\bar{t}$ ,  $\bar{\theta}$  – середня температура сушильного агента у шарі та матеріалі,  $\text{К}$ .

Зробивши ряд допущень і вирішивши рівняння відносно  $N_{\max}$ , одержуємо відому формулу максимальної швидкості сушіння:

$$N_{\max} = \frac{c_{\text{пов}} + c_{\text{п}} X_1}{\frac{\psi \eta (I_{\text{п}} - I_{\text{р}}) \rho_0 h (1 - \varepsilon)^2}{G_{\text{пов}} (t_1 - \theta)} - \frac{c_{\text{п}} \rho_0 h}{2G_{\text{пов}}}}, \quad (6)$$

де  $\varepsilon$  – порозність шару;  $\psi$ ,  $\eta$  – коефіцієнти.

Коефіцієнт  $\psi$  враховує характер розподілу температури сушильного агента по об'єму сушильної камери<sup>26</sup>, і визначається експериментально за формулою (7):

$$\bar{t} = \psi (t_1 + t_2). \quad (7)$$

Коефіцієнт  $\eta$  визначається експериментально і враховує, що не вся поверхня матеріалу в шарі бере участь у тепломасообміні.

<sup>25</sup> Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. Москва: Анропромиздат, 1985. 336 с.

<sup>26</sup> Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ : Сік Груп Україна, 2018. 228 с.

## 5. Схема технологічного процесу переробки батату

На підставі отриманих результатів запропонована принципова схема технологічного процесу переробки коренеплодів на чипси і порошкоподібну продукцію (рис. 4). Формування і контроль якісних показників проводиться на кожному етапі, забезпечуючи дотримання режимних параметрів та екологічну чистоту всього технологічного процесу<sup>27</sup>.

На ділянці підготовки проводиться інспекція, мийка, подрібнення сировини, промивання від вільного крохмалю, далі – тепловолога обробка та охолодження водою обробленого матеріалу. Процес зневоднення проходить за встановленими ступеневими режимами.

Герметичне фасування чипсів і порошку здійснюється в упаковку з полімерного або комбінованого матеріалу в безкисневому середовищі, завдяки чому забезпечується мікробіологічна стійкість, уповільнюється неферментативне окислення, подовжується термін зберігання.

Чипси з батату мають приємний зовнішній вигляд, рівномірний помаранчевий колір, солодкуватий смак властиві свіжій сировині, хрустку консистенцію, притаманну чипсам. Споживають чипси як самостійний вітамінний продукт або додають під час приготування їжі.

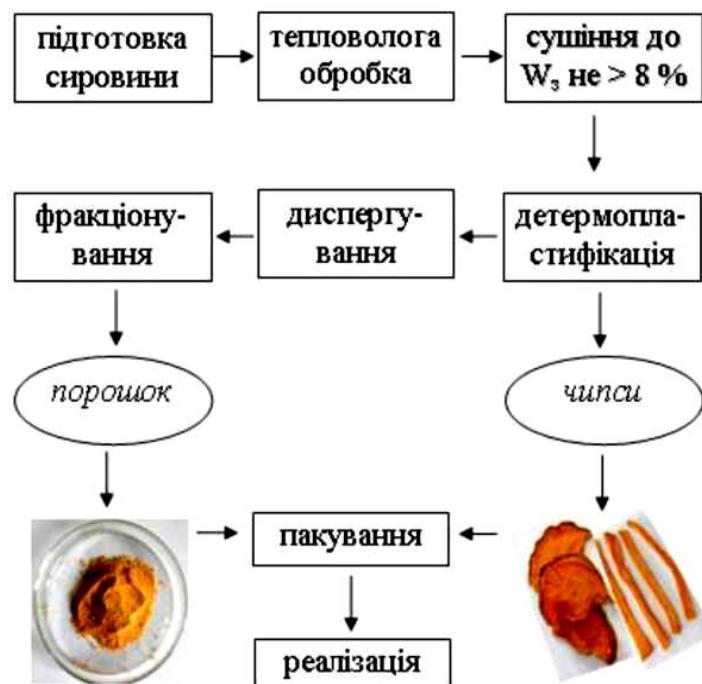
Для одержання харчового порошку висушений матеріал детермопластифікують і направляють на диспергування до порошкоподібного стану, потім – на фракціонування. Дослідженнями диспергування висушеного матеріалу визначено енергозберігаючі параметри процесу, умови підвищення виходу дрібнодисперсної фракції порошку з розміром часточок не більше 250 мкм.

Одержаний порошок із батату має властиві свіжій сировині виразний помаранчевий колір та солодкуватий смак, його широко використовують у складі продуктів харчування як натуральний наповнювач, барвник, структуроутворювач збагачуючи їх незамінними для організму вітамінами, мікроелементами та іншими біологічно активними сполуками<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

<sup>28</sup> Korese, J.K., Chikpah, S.K., Hensel, O. Effect of orange-fleshed sweet potato flour particle size and degree of wheat flour substitution on physical, nutritional, textural and sensory properties of cookies. *Eur. Food Res. Technol.* 2021. 247. P. 889–905. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03672-z>.



**Рис. 4. Принципова схема технологічного процесу переробки батату<sup>29</sup>**

Апробація використання порошку із батату під час виготовлення борошняних виробів доводить його технологічність, простоту та зручність у застосуванні.

Порошок додавали в сухому стані та попередньо відновленому в частині рідини, що передбачена рецептурою. Визначено, що оптимальна маса доданого порошку коливається в інтервалі 3...5%, при цьому заощаджується маса пшеничного борошна. Високий ступінь дисперсності сприяє рівномірному розподілу та повному відновлюванню у масі продукту і вдало поєднується з борошняною основою та рештою харчових інгредієнтів. Додання порошку поліпшує текстуру та забезпечує світло-жовте забарвлення готового продукту. Вологоутримуюча властивість порошку дає змогу довше зберігати свіжість борошняних виробів, запобігаючи їх висиханню<sup>30</sup>.

<sup>29</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоєфективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.

<sup>30</sup> Шапар Р.О., Гусарова О.В. Натуральні добавки із рослинної сировини. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека* : Міжн. наук.-практ. конф. (Київ, 19–20 листопада 2020 р.). Київ : НУХТ, 2020 р. С. 14–16.

Поєднання натуральності, функціональності, мікробіологічної чистоти, характеризує високу якість і безпечність порошку із батату, внесення його у харчові вироби сприятиме створенню продуктів з направленими оздоровчими властивостями.

## **ВИСНОВКИ**

1. На підставі проведених досліджень визначено оптимальні умови тепловологої обробки коренеплодів батату, відповідно з якими необхідний ефект обробки залежить від розмірів і форми зневоднюваного матеріалу та досягається за температури матеріалу 80...95 °С з витримкою 50...600 с. Вплив температури та тривалості знаходяться в обернено пропорційній залежності.

2. Базуючись на результатах експериментальних досліджень, узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння коренеплодів батату, побудовано графічні залежності. Характер кривих показує, що видалення вологи при зазначених параметрах процесу проходить зі спадною швидкістю впродовж усього зневоднення.

3. Розроблено та обґрунтовано енергоефективні ступеневі режими зневоднення, за якими температура теплоносія на першому етапі процесу підтримується у діапазоні 80...100 °С, на другому 55...70 °С.

4. Температура матеріалу впродовж сушіння не перевищує гранично-допустиму величину, завдяки чому забезпечується високий ступінь збереження природних властивостей сировини.

5. Використання двоступеневого зневоднення сприяє інтенсифікації процесу, скороченню тривалості та зниженню теплових витрат до 15%.

6. Розраховано значення відносних коефіцієнтів сушіння та наведено залежність для розрахунку тривалості зневоднення коренеплодів у загальному вигляді.

7. Показана можливість і одержано позитивні результати щодо застосування порошку із батату в борошняних виробах. Визначено, що оптимальна маса доданого порошку коливається від 3 до 5%.

Незважаючи на те, що дослідження проводились у рамках міжнародного співробітництва, з огляду на зростаючу популярність батату в Україні отримані результати актуальні і для вітчизняних виробників.



## АНОТАЦІЯ

У роботі зосереджено увагу на крохмалевмісній сировині, зокрема на коренеплодах батату, описано хімічний склад, існуючі методи сушіння. Мета – дослідження конвективного зневоднення коренеплодів та пошук шляхів інтенсифікації процесу для скорочення тривалості сушіння, зниження теплових витрат і забезпечення максимально повного збереження природних властивостей сировини. Об'єкт дослідження – коренеплоди батату помаранчевого кольору (*Ipomoea batatas* L.). Зневоднення здійснювали методом конвективного сушіння до залишкової вологості не більше 6%. На підставі проведених досліджень визначено оптимальні умови тепловологої обробки коренеплодів батату. Необхідний ефект обробки досягається за температури матеріалу 80...95 °С із витримкою 50...600 с. Розроблено та обґрунтовано енергоефективні ступеневі режими зневоднення за якими температура теплоносія на першому етапі процесу підтримується у діапазоні 80...100 °С, на другому 55...70 °С. У роботі представлено розрахунок загальної тривалості процесу сушіння коренеплодів батату за методом Краснікова В. На підставі отриманих результатів запропоновано принципову схему технологічного процесу переробки коренеплодів на чипси і порошкоподібну продукцію. Висновки. Енергоефективні двоступеневі режими зневоднення забезпечують скорочення тривалості сушіння, зниження теплових витрат до 15% та одержання сушених продуктів із високими органолептичними показниками.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Конвективне зневоднення коренеплодів батату при виробництві харчових продуктів. Збірник праць XVII Міжн. наук. конф. “Удосконалення процесів і апаратів обладнання харчових та хімічних виробництв”. (Одеса, 3-8 вересня 2018 р.). Одеса. 2018. С. 58–61.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. URL: <http://www.faostat.fao.org>. (дата звернення 15.03.2020).
3. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing / ed. by Nirmal K. S. Wiley-Blackwell: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. 772 p. doi: <http://doi.org/10.1002/9780470958346>.
4. Bovell-Benjamin A. C. Sweet. Potato: a review of its past, present, and future role in human nutrition. *Advances in Food Nutrition Research*. 2007. Vol. 52, Issue 1. P. 1–59. DOI: [http://doi.org/10.1016/s1043-4526\(06\)52001-7](http://doi.org/10.1016/s1043-4526(06)52001-7).

5. Ngankham Joykumar Singh, Ram Krishna Pandey.. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L). *Food and Bioproducts Processing*. 2012. 90 (2). P. 317–322. doi:10.1016/j.fbp.2011.06.006.
6. Zhong T., Lima M. The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. *Bioresour. Technol.* 2003. 87. P. 215–220.
7. Silayo, V.G.K., Laswai, H.S., Mkuchu, J., Mpagalile, J.J. Effect of sun-drying on some quality characteristics of sweet potato chips. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*. 2003. 3 (2). URL: <https://www.ajol.info/index.php/ajfand/article/view/19143>.
8. Okungbowa FI, Osagie M. Mycoflor of sun-dried sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) slices in Benn City, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*. 2009. 8 (14). P. 3326–3331.
9. Способ производства пищевых спиралевидных чипсов из клубней батата: пат. 0002631393 Российская Федерация: МПК № 2017100171; заявл. 09.01.2017; опубл. 21.09.2017. Бюл. № 27.
10. Method for producing health sweet potato chips: pat. No. CN106901277. China: № 102017000296117; appl. 28.04.2017; pub. 30.06.2017.
11. Bui My Trang, Son Young Lan, Ji Hyun Park, Hyun Wook Jang, Kyung Mi Kim, Yong Sik Cho, Young Hwang, Ha Yun Kim. The Effects of Pretreatment Methods on Quality Characteristic of Hot Air-dried Sweet Potato Slices. *Food Engineering Progress*. 2020. Vol. 24. No. 3. P. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.13050/foodengprog.2020.24.3.164>.
12. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Розробка енергоефективних режимів сушіння крохмалевмісної сировини. *ScienceRise*. 2018. (8). С. 36–41. DOI: <https://10.15587/2313-8416.2018.141156>.
13. Волчкова Н.Т., Ионова А.М. и др. Производство продуктов питания из картофеля. Легкая и пищевая промышленность: Москва, 1984. С. 192.
14. Aliyeva N.F. The identification of the activity of peroxidase in apples and potatoes under normal and saline conditions. *The World of Medicine and Biolog.* 2011. 31 (4). P. 65–67.
15. Красников В.В. Кондуктивная сушка. Москва : Энергия, 1973. 288 с.
16. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Вологообмін під час зневоднення коренеплодів батату. *Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XVIII Міжн. наук.-пр. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених.* (Київ, 21–22 травня 2020). Київ : «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2020. С. 43–46.

17. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. Москва : Анропромиздат, 1985. 336 с.

18. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ : Сік Груп Україна, 2018. 228 с.

19. Korese, J.K., Chikpah, S.K., Hensel, O. Effect of orange-fleshed sweet potato flour particle size and degree of wheat flour substitution on physical, nutritional, textural and sensory properties of cookies. *Eur. Food Res. Technol.* 2021. 247. P. 889–905. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03672-z>.

20. Шапар Р.О., Гусарова О.В. Натуральні добавки із рослинної сировини. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека: Міжн. наук.-практ. конф. (Київ, 19–20 листопада 2020 р.)*. Київ: НУХТ, 2020 р. С. 14–16.

**Information about the authors:**

**Shapar Raisa Oleksiivna,**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Leader Researcher at the Department  
of Mass Transfer in Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine

**Husarova Olena Vitaliivna,**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher at the Department  
of Mass Transfer in Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine