ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ЦУКАТІВ З ГАРБУЗА

Гузьова І.О., канд. техн. наук, доцент, Атаманюк В.М., д-р техн. наук, професор
НУ «Львівська політехніка»

Анотація. У статті описується особливість кінетики сушіння цукатів. Цукати, корисний для організму продукт, виготовлений з фруктів, овочів і ягід. Об'єктом дослідження є цукат з гарбуза. Спосіб приготування містить в собі кілька етапів: очищення, нарізка, варіння в цукровому сиропі, сушіння. Готовий продукт має відмінну якість і органолептичні властивості. Сушіння цукатів – складний, тривалий і енергоємний процес. Процес сушіння залежить від зовнішніх умов, структури матеріалу і форми зв'язку вологи з матеріалом. Авторами статті проведено дослідження кінетики сушіння цукатів температурою 20°C – 80°C. Експерименти проводилися наступним чином: частину просочених цукровим сиропом скибок гарбуза температурою 80°C відділяють від рідкої фази і сушать. Другу частину залишають в сиропі, який охолоджують до 60°C, після чого висушують. Третю частину цукатів залишають в сиропі, який охолоджують до 40°C, після чого висушують. Аналогічно четверту частину залишають в сиропі, який охолоджують до 20°C, після чого також висушують. Сушіння чотирьох частин відбувається окремо, за однакових умов: температура теплового агента (повітря) – 100 °C, швидкість теплового агента 2 м/с. Сушіння відбувається в контейнері фільтраційним методом. Контейнер складається з чотирьох частин, які мають перфоровані перегородки. На кожну з чотирьох перфорованих перегородок цукати розкладають рівномірно в один шар в шаховому порядку. Такий метод розміщення цукатів сприяє рівномірному розподіленню теплового агента, мінімізує гідралічний опір шару. В результаті дослідження встановлено залежності швидкості сушки цукатів від температури, обґрунтовано вплив форми зв'язку вологи з матеріалом на характер і тривалість сушіння, а також теоретично визначено час сушіння для різних температурних режимів.

У статті теоретично досліджується кінетика сушіння цукатів з гарбуза в умовах різних температур плодів. Сушіння цукатів відбувається в періоді спадаючої швидкості сушіння. Криві швидкості сушки складаються з двох частин. Перша частина відповідає випаровуванню капілярної вологи з поверхні міжклітинної простору. Друга частина кривих відповідає випаровуванню осмотично зв'язаної міжклітинної і клітинної вологи. Також в матеріалі присутній термодифузія, яка уповільнює процес сушіння. В умовах малих перепадів температур термодифузія відіграє незначну роль. Тому найбільш швидко висушується цукат з температурою 80°C. Цукати з температурою 20°C висушуються повільно. Це явище можна пояснити великим впливом термодифузії і кристалізацією цукру під час тривалої сушки. Проведено узагальнення і апроксимація експериментальних даних на основі диференціального рівняння швидкості сушіння. На основі теоретичних узагальнень виведені рівняння, що дозволяють визначити числові значення швидкості сушіння і коефіцієнта сушіння, а також теоретично встановити характер зміни швидкості сушіння і розрахувати час сушіння до необхідної вологості. У статті обґрунтовано раціональні температурні режими (40°C – 80°C) сушки цукатів з гарбуза.

Ключові слова: кінетика, другий період сушіння, коефіцієнт сушіння, цукати

STUDY OF DRYING KINETICS CANDIED PUMPKIN

Huzova I., Ph.D., Assoc., Atamanyuk V., Doctor of Technical Sciences, prof.
Lviv Polytechnic National University

Abstract. The article describes the peculiarity of the kinetics of candied fruit drying. The object of research is a pumpkin fruit. Candied fruit, a healthy product made from vegetables, fruits and berries. Method of preparation: skinned, sliced, steam treatment, cooking in sugar syrup, drying and storage 6 months. The finished product has excellent quality and organoleptic properties. Drying of candied fruits is a complex, lengthy and energy-intensive process. The drying process depends on external conditions, the structure of the material and the form of moisture-to-material bond.

The result of the study is the establishment of the dependence of the drying rate on temperature, the substantiation of the form of moisture with the material on the nature and duration of drying, as well as the theoretical determination of the drying time for various temperature regimes. The experiments were carried out as follows: a part of the pumpkin pieces soaked in sugar syrup with a temperature of 80°C is separated from the liquid phase and dried. The second part is left in the syrup, which is cooled to 60 °C, and then dried. The third part of the candied fruit is

left in the syrup, which is cooled to 40°C, and then dried. Similarly, the fourth part is left in the syrup, which is cooled to 20°C, after which it is also dried. Drying of the four parts occurs separately, under the same conditions: the temperature of the heating agent (air) is 100°C, the speed of the heating agent is 2 m/s. Drying takes place in a container by a filtration method. The container consists of four parts which have perforated partitions. On each of the four perforated partitions, candied fruits are laid out evenly in one layer in a checkerboard pattern. This method of placing candied fruits contributes to the uniform distribution of the thermal agent, minimizes the hydraulic resistance of the layer.

The article investigates the kinetics of drying candied pumpkin fruits in conditions of different temperatures of fruits. Drying of candied fruits occurs during a period of decreasing drying speed. The drying rate curves are in two parts. The first part corresponds to the evaporation of capillary moisture from the surface of the intercellular space. The second part of the curves corresponds to the evaporation of the osmotically of the intercellular and cellular moisture. Also, there is thermal diffusion in the material, which slows down the drying process.

Thermal diffusion is insignificant under the condition of small temperature differences. Therefore, candied fruit with a temperature of 80 °C is most quickly dried. Candied fruit with a temperature of 20 °C is dried slowly. This phenomenon can be explained by the large influence of thermal diffusion and sugar crystallization during prolonged drying. The generalization and approximation of experimental data based on the differential equation of the drying rate is carried out. On the basis of theoretical generalizations, equations have been derived that allow one to determine the numerical values of the drying rate and drying coefficients, as well as theoretically establish the nature of the drying rate change. Reasonable rational temperature conditions (40 °C - 80 °C) during drying of candied pumpkin fruits.

Key words: kinetics, period of decreasing drying rate, drying coefficient, candied fruit

Постановка проблеми. Цукат, корисний для організму продукт, виготовлений з фруктів, овочів та ягід, витриманих в цукровому сиропі, підлягає сушінню до певного кінцевого вологовмісту, яка забезпечує готовому продукту відмінну якість та органолептичні властивості. Сушіння цукатів – складний, тривалий в часі та енергоємний процес, який залежить від зовнішніх умов, структури матеріалу та форми зв'язку вологи з ним. Саме тому, правильний вибір умов сушіння, визначення зв'язку вологи з внутрішньою структурою цукатів та визначення часу сушіння до кінцевого вологовмісту, є актуальною задачею з точки зору зменшення енергозатрат на сушіння з одночасним збереженням якості готового продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характер перебігу процесу сушіння, визначається механізмом перенесення вологи в середині матеріалу, механізмом переміщення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище та енергетикою випаровування. Під час сушіння змінюються структурно-механічні, технологічні та біохімічні властивості матеріалу [1]. Зміна цих властивостей обумовлено тим, що в процесі сушіння відбувається зміна форм зв'язку вологи з матеріалом, а також характер переміщення вологи з середини матеріалу до його поверхні.

Механізм переміщення вологи в середині матеріалу визначається формою зв'язку вологи з матеріалом, та в кожному конкретному випадку має свою особливість [2]. Виходячи з відомої класифікації вологих матеріалів [3], в капілярнопористих, капілярнопористих колоїдних та колоїдних матеріалах, може бути наявним, як період постійної швидкості сушіння, період спадаючої швидкості сушіння так і обидва періоди [4–5]. Це залежить від природи самого матеріалу та може бути визначено експериментальним шляхом.

Під час сушіння харчових продуктів, важливим є встановлення оптимального температурного режиму сушіння, який би давав можливість за невеликих енергозатрат зберегти якість готового продукту. Також важливим є обґрунтування та узагальнення кінетики процесу сушіння. Якщо на період постійної швидкості сушіння впливають зовнішні фактори (температура, тиск теплового агенту), то період спадаючої швидкості сушіння залежить від внутрішньої структури та форми зв'язку вологи з матеріалом.

На переміщення вологи в середині матеріалу впливатиме його температура та температура теплового агенту. Якщо в капілярно пористих тілах незначної товщини температурний режим переважно має вплив на період постійної швидкості сушіння, то в капілярнопористих колоїдних тілах значної товщини температурний режим також впливає на процеси дифузії вологи в середині матеріалу. В другому випадку можливі різні напрямки дифузії вологи в середині матеріалу, що буде залежати від температури теплового агенту, температури та внутрішньої структури матеріалу, який надходить на сушіння [6–7]. Отже, на кінетику сушіння впливатимуть як зовнішні фактори, так і структура матеріалу, тому характер зміни вологовмісту матеріалу в часі в кожному конкретному випадку має свої особливості, визначається експериментально та узагальненням експериментальних даних.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є дослідження кінетики сушіння цукатів з гарбуза за умов різних температур самих плодів, встановлення залежності швидкості сушіння цукатів від їх температури, обґрунтування впливу форми зв'язку вологи з матеріалом на характер та тривалість сушіння, а також теоретичне визначення часу сушіння для різних температурних режимів.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є плоди гарбуза сорту «Стофунтовка вассма». Цукати з плодів гарбуза виготовляють згідно технології наведеної в літературі [8]. Плід відділяють від шкірки, вирізають скибки однакових розмірів – 20x10x10мм. Підготовлені скибки бланшують, після чого витримують в цукровому сиропі (75 % мас.) за температури 80 °С. Таким чином отримують цукати, котрі для довготривалого зберігання підлягають сушінню.

Частину просочених скибок гарбуза температурою 80 °С відділяють від рідкої фази і сушать. Другу частину залишають в сиропі, який охолоджують до 60 °С, після чого висушують. Третю частину цукатів залишають в сиропі, який охолоджують до 40 °С, після чого висушують. Аналогічно четверту частину залишають в сиропі, який охолоджують до 20 °С, після чого також висушують. Сушіння чотирьох частин відбувається окремо, за однакових умов: температура теплового агента (повітря) – 100 °С, швидкість теплового агента 2 м/с, початкова маса кожної частини, відділеної від рідкої фази – 395,4 г.

Сушіння відбувається на установці та за методикою наведеною в [9]. Схема контейнера для сушіння цукатів фільтраційним методом представлена на рис. 1. Контейнер 1 діаметром 0,1 м складається з чотирьох частин, які мають перфоровані перегородки 2. Стінки контейнера та перфоровані перегородки виготовлені з фторопласту, що відповідає вимогам сушіння харчових продуктів [8]. На кожну з чотирьох перфорованих перегородок цукати 3 розкладають по 16 штук рівномірно в один шар в шаховому порядку (рис. 1). Такий метод розміщення цукатів сприяє рівномірному розподіленню теплового агента, мінімізує гідралічний опір шару.

1 – контейнер; 2 – перфоровані перегородки; 3 – цукати

Рис. 1 – Схема контейнера для сушіння цукатів

Крізь сформований шар цукатів профільтровують тепловий агент. Через задані проміжки часу фіксують зміну ваги контейнера за допомогою електронної ваги AXSIS-3000 з точністю до 0,01 г. Дослід триває до досягнення цукатами вологості 20 % (за сухою речовиною). За умов такої кінцевої вологості, готовий цукат зберігається 6 місяців, не втрачаючи своїх смакових якостей та поживних властивостей. Під час зберігання кінцева вологість цукатів зменшувалася на 1 – 2 %. Тому, вважаємо рівноважну вологість $W_p=18\%$.

Виклад результатів та їх аналіз. Результати зміни вологовмісту цукатів в часі, під час сушіння цукатів температурою 20 °С, 40 °С, 60 °С, 80 °С, наведені на рис. 2.

1 – кінетична крива сушіння цукатів температурою 20 °С; 2 – кінетична крива сушіння цукатів температурою 40 °С; 3 – кінетична крива сушіння цукатів температурою 60 °С; 4 – кінетична крива сушіння цукатів температурою 80 °С

Рис. 2 – Кінетика сушіння цукатів з гарбуза

Як видно з рис.2, цукати температурою 20°C досягають кінцевої вологості за 8100 с, цукати температурою 40°C – за 7020 с, цукати температурою 60°C – 80°C – за 6300 с та 3780 с відповідно. Температура теплового агента в чотирьох випадках – 100°C. На кривих 1 – 4 (рис. 2) немає горизонтальної ділянки на початку процесу сушіння, що свідчить про відсутність періоду постійної швидкості сушіння.

Остаточне підтвердження відсутності періоду постійної швидкості сушіння, можна побачити з залежності зміни швидкості сушіння dW/dt від вологовмісту цукатів W (рис. 3).

1 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 20°C; 2 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 40°C; 3 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 60°C; 4 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 80°C

Рис. 3 – Залежності зміни швидкості сушіння dW/dt від вологовмісту цукатів W

Як об'єкт сушіння, плід гарбуза являє собою капілярнопористий колоїдний матеріал, клітини якого, по формі нагадують квадрати різного розміру, міжклітинний простір – чітко виражений [10], тобто в плоді гарбуза наявною є міжклітинна волога та внутрішня волога клітин. Проте, сушінню підлягає бланшований та насичений розчином цукрози плід (цукат). Після бланшування, клітини гарбуза руйнуються, стають меншими в розмірах, міжклітинний простір розширюється [10]. Після насичення цукрозою бланшованого гарбуза, зруйновані клітини дещо збільшуються, міжклітинний простір стає щільнішим. В цукатах, які підлягають сушінню, наявною є капілярна волога в міжклітинному просторі та осмотично зв'язана міжклітинна та клітинна волога.

Проаналізуємо характер кривих швидкості сушіння (рис. 3). Криві швидкості сушіння 1 – 4 чітко можна розділити на дві частини. Перша частина кривих (справа наліво) відповідає випаровуванню капілярної вологи з поверхні міжклітинного простору. Швидкість сушіння на цій ділянці значно зменшується до певного критичного значення, яке на всіх кривих (1 – 4) з невеликою похибкою відповідає критичному вологовмісту $W_{кр} = 120$ %. Значне зменшення швидкості сушіння на першій частині кривих пояснюється як формою зв'язку вологи з матеріалом так і різницею температур між матеріалом та тепловим агентом. На видалення капілярної вологи, яка є зв'язаною з матеріалом фізико-механічно витрачається значно менша кількість енергії, ніж на видалення осмотичної вологи, зв'язаної фізико-хімічно. З початкового моменту сушіння температура поверхні матеріалу збільшується протягом незначного проміжку часу і наближається до температури теплового агента. Температура центру матеріалу також підвищується, проте повільніше протягом певного часу. Виникає температурний градієнт між тепловим агентом та серединою матеріалу який поступово зменшується, наближуючись до певного рівноважного значення.

Швидкість сушіння цукатів температурою 20°C є мінімальною та зменшується повільно (рис. 3., крива 1) тому, що відбувається прогрів середини матеріалу, при цьому температурний градієнт зменшується протягом певного часу. Швидкість сушіння цукатів температурою 80°C є максимальною та зменшується швидко (рис. 3., крива 4) тому, що середина матеріалу є прогрітою, при цьому температурний градієнт зменшується протягом незначного проміжку часу.

Друга частина кривих (справа наліво) відповідає випаровуванню осмотично зв'язаної міжклітинної та клітинної вологи. Така волога видаляється без видалення енергії, шляхом вибіркової дифузії через стінки клітин. Як видно з кінетичних кривих (рис. 2) та кривих швидкості сушіння (рис. 3) процес видалення осмотичної вологи є тривалим в часі. Випаровування вологи з поверхні матеріалу створює перепад вологовмісту між внутрішніми шарами та поверхневим шаром, що викликає переміщення вологи з внутрішніх шарів до

поверхневих Цукати мають значну товщину і під час сушіння випаровування вологи відбувається в основному на поверхні матеріалу, а в середині матеріалу, волога переміщається в рідкому стані. Для таких матеріалів характерною є термодифузія, що сповільнює процес сушіння. Наявність температурного градієнта в середині матеріалу, ускладнює механізм перенесення вологи. Під впливом перепаду температур між внутрішніми та поверхневими шарами, волога намагається дифундувати в середину тіла. Тобто відбувається термодифузія, під час якої волога переміщується в напрямку потоку тепла.

За умов малих перепадів температур термодифузія відіграє незначну роль. Тому швидкість сушіння цукатів температурою 80°C є максимальною і зменшується швидше (рис. 3., крива 4). Із зменшенням температури цукатів швидкість сушіння буде меншою та спадати повільніше (рис. 3).

Проведемо узагальнення кінетики сушіння. У зв'язку з тим, що крива швидкості сушіння складається з двох частин, апроксимуємо кінетику сушіння періоду спадаючої швидкості (другого періоду) наступним узагальнюючим рівнянням [11]:

$$\frac{dW}{d\tau} = -K(W - W_p)^n \quad (1)$$

де W – біжучий вологовміст цукатів, %;

τ – біжучий час сушіння, с;

K – коефіцієнт сушіння, який залежить від матеріалу та режиму сушіння, 1/с;

W_p – рівноважний вологовміст цукатів, %

Згідно рівняння (1) були апроксимовані експериментальні дані залежності швидкості сушіння від вологовмісту цукатів (рис. 3).

Криві апроксимації наведені на рис. 4. Точки на графіку відповідають експериментальним значенням в залежності від режиму сушіння, а криві є узагальненням експериментальних даних степеневими функціями.

1 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 20°C; 2 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 40°C; 3 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 60°C; 4 – крива швидкості сушіння цукатів температурою 80°C

Рис. 4 – Узагальнюючі криві зміни швидкості сушіння

Як і криві швидкості сушіння (рис. 3), узагальнюючі криві сушіння 1 – 4 (рис. 4) чітко можна розділити на дві частини. Точка розподілу кривих на дві частини відповідає критичному вологовмісту, значення якого можна побачити на окремо відображених узагальнюючих кривих зміни швидкості сушіння цукатів температурою 20°C, 40°C, 60°C, 80°C відповідно (рис. 5а–5г).

Як видно з рис. 5, точка D' відповідає початковій швидкості сушіння (N_{1-4} – швидкість сушіння цукатів температурою 20°C, 40°C, 60°C, 80°C відповідно за перші 3 с), яка зростає із збільшенням температури цукатів. Значення початкової швидкості сушіння, в залежності від температури, занесені в таблицю 1. Точка D'' (рис. 5) з невеликою похибкою $\pm 5\%$ відповідає критичному вологовмісту цукатів $W_{кр}$ та ділить узагальнюючу криву сушіння на дві частини.

а)

б)

в)

г)

а – крива 1 швидкості сушіння цукатів температурою 20°C; б – крива 2 швидкості сушіння цукатів температурою 40°C; в – крива 3 швидкості сушіння цукатів температурою 60°C; г – крива 4 швидкості сушіння цукатів температурою 80°C

Рис. 5 – Узагальнюючі криві зміни швидкості сушіння

З рис. 5, більш наочно видно дві частини узагальнюючих кривих спадаючої швидкості сушіння та експериментальні точки. Дві частини узагальнюючих кривих мають різну кривизну, отже показники степеню в рівнянні (1) будуть різними.

Для цукатів температурою 20 °C (рис. 5а), похибка між експериментальними та теоретично визначеними значеннями швидкості сушіння є дещо більшою, ніж за умов сушіння цукатів за температур 40 °C – 80 °C, та складає $\pm 20\%$. Також видно (рис. 5б–5г), що похибка між експериментальними та теоретично визначеними значеннями швидкості сушіння цукатів до критичної вологості ($W_{kp}=120\%$) є меншою $\pm 5\%$, ніж похибка $\pm 15\%$ між експериментальними та теоретично визначеними значеннями швидкості сушіння цукатів від критичної до рівноважної вологості ($W_p=18\%$). Це пояснюється тим, що вибіркова дифузія ускладняється частковою кристалізацією цукру на стінках клітин, особливо під час сушіння цукатів температурою 20 °C, що пояснюється повільним прогріванням таких цукатів з середини.

З аналізу експериментальних та теоретичних досліджень можна зробити висновок про недоцільність сушіння цукатів температурою 20 °C на нижче, через тривалість процесу сушіння та кристалізацію цукру в середині цукату.

В таблиці 1. наведені узагальнюючі рівняння процесу сушіння цукатів з гарбуза для температур (20 °С – 80 °С) від початкового вологовмісту W_0 до критичного $W_{кр}$ та узагальнюючі рівняння процесу сушіння цукатів з гарбуза для температур (20 °С – 80 °С) від критичного вологовмісту $W_{кр}$ до рівноважного W_p .

Таблиця 1

Узагальнення кінетики сушіння цукатів

t, °C	N, %/с	Узагальнюючі рівняння процесу сушіння цукатів від W_0 до $W_{кр}$	Узагальнюючі рівняння процесу сушіння цукатів від $W_{кр}$ до W_p	$K \cdot 10^5$, 1/с
20	0.19	$\frac{dW}{d\tau} = 0,9 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.95}$	$\frac{dW}{d\tau} = 0,9 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.725}$	0.9
40	0.26	$\frac{dW}{d\tau} = 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.95}$	$\frac{dW}{d\tau} = 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.725}$	1
60	0.35	$\frac{dW}{d\tau} = 1,5 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.95}$	$\frac{dW}{d\tau} = 1,5 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.725}$	1.5
80	0.5	$\frac{dW}{d\tau} = 3 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.95}$	$\frac{dW}{d\tau} = 3 \cdot 10^{-5} (W_0 - W_{кр})^{1.725}$	3

Як видно з таблиці 1, узагальнюючі рівняння для першої та другої частини кривої сушіння мають різні значення показника степені (n), що пояснюється, як вже було вказано вище, різною формою зв'язку вологи з матеріалом. Перша частина кривої являє собою степеневу залежність з показником степені $n' = 1.95$, а друга частина – степеневу залежність з показником степені $n'' = 1.725$ (табл. 1)

Коефіцієнт сушіння (K) для двох частин кривої є однаковим та зростає зі збільшенням температури цукатів, що повністю підтверджує його фізичний зміст. Значення коефіцієнта сушіння (K) наведені в таблиці 1.

Інтегруючи рівняння (1) (за умов $n \neq 1$) отримаємо рівняння для розрахунку часу сушіння в другому періоді:

$$\tau_{II} = - \frac{(W_0 - W_p)^{1-n}}{K \cdot (1-n) \cdot 100} \quad (2)$$

Рівняння (2) дає змогу розрахувати час сушіння цукатів з гарбуза від початкового вологовмісту до рівноважного. Проте, як вказують експериментальні дані (рис. 4) та узагальнюючі рівняння (табл. 1) від початкового вологовмісту W_0 до критичного $W_{кр}$ час сушіння цукатів з гарбуза розраховується згідно рівняння (3), а від критичного вологовмісту $W_{кр}$ до рівноважного W_p – згідно рівняння (4):

$$\tau'_{II} = - \frac{(W_0 - W_{кр})^{1-n'}}{K \cdot (1-n') \cdot 100} \quad (3)$$

$$\tau''_{II} = - \frac{(W_{кр} - W_p)^{1-n''}}{K \cdot (1-n'') \cdot 100} \quad (4)$$

$$\tau_{заг} = \tau'_{II} + \tau''_{II} \quad (5)$$

Згідно рівняння (5) можна розрахувати загальний час сушіння цукатів температурою (20°C – 80°C).

Похибка, між експериментально отриманим часом сушіння та часом сушіння, розрахованим згідно рівняння (5) не перевищує $\pm 15\%$.

Виходячи з того, що із збільшенням температури цукатів зростає швидкість сушіння, можна зробити припущення, що для певного об'єкту сушіння (цукат з гарбуза) за однакового початкового вологовмісту W_0 величина $N \cdot \tau$, розрахована для різних режимів сушіння змінюється з відповідним біжучим вологовмістом W і від режиму сушіння не залежить. Всі криві сушіння цукатів, що відповідають різним температурним режимам, узагальнюються однією кривою (рис. 6) в координатах $W = f(N \cdot \tau)$. Узагальнена крива сушіння дає змогу побудувати криву сушіння цукатів для будь якого режиму сушіння в межах від 20°C до 100°C при зміні як температури цукатів, так і температури теплового агенту, якщо відома початкова швидкість сушіння.

Рис. 6 – Узагальнена крива сушіння

Отримана узагальнена крива сушіння та числові значення степеневих функцій дають змогу розрахувати час сушіння цукатів та теоретично визначити числові значення вологовмісту в певні проміжки часу, а також характер зміни вологовмісту цукатів в часі в залежності від режиму сушіння в межах температур 20 °C до 100 °C.

Висновки. На основі експериментальних досліджень обґрунтована кінетика сушіння цукатів з гарбуза та вплив на неї температури плодів, природи матеріалу та форми зв'язку води з ним. На основі теоретичних узагальнень виведені рівняння, які дають змогу визначити числові значення швидкості сушіння та коефіцієнта сушіння, а також теоретично встановити характер зміни швидкості сушіння та розрахувати час сушіння до необхідної вологості. Обґрунтовані раціональні температурні режими (40 °C – 80 °C) під час сушіння цукатів з гарбуза.

References

1. Chanpreet Singh, Nitin Saluja & Rajeev Kamal Sharma. (2019). A computation-driven, energy-efficient and hybrid of microwave and conventional drying process for fast gooseberry candy production. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 53(4), 259-275. doi.org/10.1080/08327823.2019.1677431
2. Atamanyuk, V. M. (2007). *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів*: дис. на здобуття наук. ступеня: доктор технічних наук: 05.17.08: захист 10.12.2007 / наук. кер. я. М. Ханік. Л'вів: НУ "Л'вівська політехніка".
3. Lykov, A. V. (1968). *Теорія сушки*. Москва: Енергія.
4. Rimar, T. I. (2009). *Ресурсозбереження під час сушіння колійних матеріалів*. *Вісник інженерної академії України*, 1(1), 193-196.
5. Tsurkan, O., Gerasimov, O., Polyevoda, Y., Tverdokhlib, I., Rimar, T., Stanislavchuk, O. (2017). Kinetic features of vibrating and filtration dewatering of fresh-peeled pumpkin seeds. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 2(52), 69-76. doi: <https://inmateh.eu/volumes/old-volume/volume-52-no-2-2017/article/kinetic-features-of-vibrating-and-filtration-dewatering-of-fresh-peeled-pumpkin-seeds>
6. Hosovsky, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*, 4(10(4)), 459 – 463. doi.org/10.23939/chcht10.04.459
7. Matkivska, I., Gumnytskyi, Y., & Atamanyuk, V. (2014). Kinetics of Diffusion Mass Transfer during Filtration Drying of Grain Materials. *Chemistry & Chemical Technology*, 8(3), 359-363. doi:10.23939/chcht08.03.359.
8. Huz'ova, I. O. та ін. (2015). *Дослідження змін температурних режимів процесу сушіння у виробництві цукатів з гарбуза*. *Збірник праць V Міжнародної науково-практичної конференції «Інновативні енерготехнології»* Одес. н-тс. харч. технологій, 1(1), 129-134.
9. Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z., Mykychak B. (2016). Selection of optimal method of forming a layer of candied fruits during filtration drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11(83)), 10 – 15. doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81409
10. Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z. (2017). Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Food Science and Technology*, 4(11), 21-28. doi.org/10.15673/fst.v1i4.727.
11. Sazhin, B. S., Sazhin, V. B. (1997). *Научные основы техники сушки*, Москва: Наука.

Отримано в редакцію: 26.06.2020
Прийнято до друку: 29.09.2020

Received: 26.06.2020
Approved: 29.09.2020