

UDC 66.021

DYNAMICS OF DRYING PROCESSES OF PLANT RAW MATERIAL IN THE PERIOD OF DECREASING SPEED

Iryna O. Huzova*, Volodymyr M. Atamanyuk

Lviv Polytechnic National University, Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine

Received 25 July 2022; accepted 7 October 2022; available online 31 October 2022

Abstract

Removing moisture from plant materials is a necessary production step. A quality drying process improves the storage and transport of plant materials. In the case of extracting moisture from food products, for example, from candied fruits, drying should be organized under special temperature conditions. This allows long-term storage of food products without violating their organoleptic properties. The dynamics of moisture extraction from vegetable raw materials is diverse, however, regardless of the methods and methods of drying, it is the final and energy-consuming stage of production. The article investigates the kinetic dependences of changes in the moisture content of candied pumpkin. As a result, the time dependence of the temperature and moisture content of the thermal agent is obtained. Also, the result of kinetics in dimensionless coordinates is obtained, the analysis of experimental studies has been carried out. The article investigates the dynamic dependence of the change in the moisture content of candied pumpkin. As a result, the dependences of the temperature and moisture content of the thermal agent along the height of the material layer are obtained. Also, the result of dynamic in dimensionless coordinates is obtained, the analysis of experimental studies has been carried out. A physical model of the dynamics of drying in a monodisperse layer, which is dried by filtration of a thermal agent through the layer, is described. The problem of drying dynamics in a layer of monodisperse material of particles of the same shape of a parallelepiped is solved. The solution of the problem involves determining the fields of change in the moisture content of the material and the heat agent as a function of coordinates and time. The limiting condition of the third kind is also determined at the boundary of a solid body-thermal agent. Dependences are derived that make it possible to calculate the moisture content of the material and the heat agent during drying of materials to be dried in the period of decreasing speed and from which capillary bound moisture is released. The generalization of the kinetics and dynamics of drying, the mathematical models proposed in the article for calculating the drying processes, can be used to design, intensify and optimize the operation of drying equipment.

Keywords: monodisperse layer; drying kinetics; drying dynamics; mathematical model of drying.

ДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ПЕРІОДІ СПАДАЮЧОЇ ШВИДКОСТІ

Ірина О. Гузьова, Володимир М. Атаманюк

Національний університет «Львівська політехніка», вул. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Анотація

У разі вилучення вологи з харчових продуктів, зокрема таких, як цукати, сушіння має бути організоване за спеціальних температурних режимів, які б забезпечили довготривале зберігання харчових продуктів без порушення їх органолептичних властивостей. Досліджено кінетичні залежності зміни вологості цукатів з гарбуза, температури та вологовмісту теплового агенту в часі та в безрозмірних координатах; проведений аналіз експериментальних даних. Встановлено динамічні залежності зміни вологості матеріалу, температури та вологовмісту теплового агенту за висотою шару матеріалу та в безрозмірних координатах; проведений їх аналіз. Описано фізичну модель динаміки сушіння в монодисперсному шарі, що сушиться шляхом профільтрування крізь нього теплового агенту. Вирішено задачу динаміки сушіння у шарі монодисперсного матеріалу частинок однакової форми паралелепіпеда. Вирішення задачі передбачає визначення полів зміни вологовмісту матеріалу та теплового агенту як функції координат і часу та визначають граничну умову третього роду на межі тверде тіло – тепловий агент. Виведені залежності, які дають змогу розрахувати вологовміст матеріалу та теплового агенту під час сушіння матеріалів, що підлягають сушінню в періоді спадаючої швидкості та з яких виділяється капілярно зв'язана волога. Узагальнення кінетики та динаміки сушіння, запропоновані в статті математичні моделі для розрахунку процесів сушіння, можуть бути використані для проектування, інтенсифікації та оптимізації роботи сушильного обладнання.

Ключові слова: монодисперсний шар; кінетика сушіння; динаміка сушіння; математична модель сушіння.

*Corresponding author: e-mail address: irhuza@gmail.com

Вступ

Рослинна сировина являє собою матеріал органічного походження, в якому значна частина вологи зосереджена в клітинах. Динаміка вилучення вологи з рослинної сировини є різноманітною, проте, незалежно від способів та методів сушіння, є завершальною та енергозатратною стадією виробництва. Аналіз та узагальнення кінетики та динаміки сушіння рослинної сировини є актуальною задачею з точки зору прогнозування енергозатрат на процес та проектування сушильного обладнання.

Наведемо аналіз, фізичні та математичні моделі гідродинаміки та кінетики процесів фільтраційного сушіння рослинної сировини. В роботі [1] знайдені коефіцієнти тепловіддачі та запропоновані рівняння для їх розрахунку під час сушіння подрібнених стебел соняшника, знайдено коефіцієнт дифузії рідини з пористого тіла стебел соняшника в роботі [2]. У роботі [3] автори наводять фізичну модель та узагальнення гідродинамічних процесів під час сушіння бавовняного волокна. Експериментально встановлено вплив температури теплового агенту на величину дифузійного, теплового і гідродинамічного пограничних шарів і, відповідно, на інтенсивність фільтраційного висушування лущеного березового шпону [4] та кукурудзяної барди [5]. Слід зауважити, що всі вказані матеріали рослинного походження містять в собі як вільну, так і зв'язану вологу, і на кінетичних кривих сушіння спостерігається як період постійної, так і період спадаючої швидкості сушіння. Причому період спадаючої швидкості сушіння є лімітуючою стадією.

Автори статті [6] досліджують вплив різних факторів на кінетику процесу сушіння ячменю та доводять, що на кінетику сушіння вирішальний вплив має температура теплоносія. Саме тому авторами [6] рекомендовано проводити сушіння у двоступеневому режимі з метою інтенсивності прогрівання матеріалу та енергоефективності сушіння. Авторами [7] запропонована математична модель для розрахунків високотемпературних процесів сушіння рослинної біомаси, виведено рівняння кінетики сушіння та динаміки руху теплоносія. Авторами [8] досліджується стан води та її форма зв'язку з такими матеріалами, як верба, вільха, тополя. Визначено вміст вільної та зв'язаної вологи в

залежності від початкової вологості матеріалів. В роботі [9] визначається теплоємність яблук та доводиться, що теплоємність плодів яблук, які містять зв'язану вологу, можуть бути визначені виключно експериментально.

Наведемо аналіз розроблених математичних моделей процесів тепломасоперенесення, кінетики, динаміки та фазових перетворень в матеріалах органічного походження. У роботі [10] наведена математична модель для узагальнення конвективно-конденсаційного способу сушіння термолабільних матеріалів. У роботі [11] наведений чисельний метод розрахунку динаміки тепломасопереносу в процесі сушінні біомаси на основі математичної моделі, яка будувалася на базі диференціального рівняння переносу субстанції. У роботі [12] наведений метод розв'язання рівняння перенесення на основі кінцевих об'ємів для отримання тиску, температури та концентрації. У роботі [13] об'єднання двох моделей тепломасоперенесення використовується для моделювання процесу сушіння біомаси в природних умовах перед подальшим пресуванням. У роботі [14] наведені результати моделювання, які доводять значний вплив температури та незначний вплив швидкості подачі теплового агенту в барабанну сушарку під час сушіння вологих нативних частинок біомаси.

У роботі [15] наведений чисельний метод розрахунку динаміки рідини в каналі з проникними стінками. В роботі [16] наведений чисельний метод розрахунку тепломасоперенесення, в роботі [17] наведена фізична модель динаміки рідини в порах та розрахунок фазових перетворень під час сушіння пористих середовищ з паровою та рідкою фазами. В роботі [18] наведені результати розв'язання деяких двомірних задач гідродинаміки та теплообміну під час процесів сушіння.

Отже, результати експериментальних досліджень структури речовин рослинного походження дають можливість встановити форми зв'язку вологи з матеріалом. Результати експериментальних досліджень сушіння рослинної сировини дають можливість визначити вплив температури, швидкості теплового агенту, вологості матеріалу на тривалість процесів сушіння та якість висушених матеріалів. Узагальнення

кінетики та динаміки сушіння, запропоновані авторами математичні моделі для розрахунку процесів сушіння, можуть бути використані для інтенсифікації та оптимізації роботи сушильного обладнання.

Усі розглянуті кінетичні, динамічні та математичні залежності описують характер зміни вологості конкретних матеріалів та не можуть бути використані для універсальних розрахунків. Тому, подальше вивчення процесів сушіння матеріалів рослинного походження є актуальним завданням в зв'язку з їх складною будовою та зв'язком вологи з матеріалом.

Метою даної роботи є дослідження кінетики та динаміки сушіння цукатів з гарбуза, їх аналіз та узагальнення експериментальних даних. Такі дослідження дозволяють вивести аналітичну залежність, яка б дала можливість встановити зв'язок між зміною вологовмісту матеріалу та теплового агенту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- встановити кінетичні залежності зміни вологості матеріалу, температури та вологовмісту теплового агенту в часі та в безрозмірних координатах та провести їх аналіз;

- встановити динамічні залежності зміни

вологості матеріалу, температури та вологовмісту теплового агенту по висоті шару матеріалу та в безрозмірних координатах та провести їх аналіз;

- вирішити задачу динаміки сушіння у шарі монодисперсного матеріалу та шляхом узагальнення експериментальних даних встановити залежність, яка дає змогу розрахувати вологовміст матеріалу та теплового агенту під час сушіння цукатів з гарбуза.

Експериментальна частина

Плоди гарбуза, очищені від шкіри та насіння та сформовані у вигляді частинок прямокутної форми розміром 20x10x10мм насичувалися цукровим сиропом 70 % (мас.) з температурою 80 °С.

Після 3-х годин витримки сироп зливали і готові цукати з температурою 80 °С надходили на сушіння [19–23]. Тепловим агентом було повітря з температурою 100 °С та швидкістю 2 м/с. Процес сушіння цукатів здійснювали фільтраційним методом в контейнері, схема якого зображена на рис. 1. Особливістю такого сушіння є те, що сировина подається на сушіння з температурою 80 °С, тобто вносить в контейнер для сушіння додаткову кількість теплової енергії.

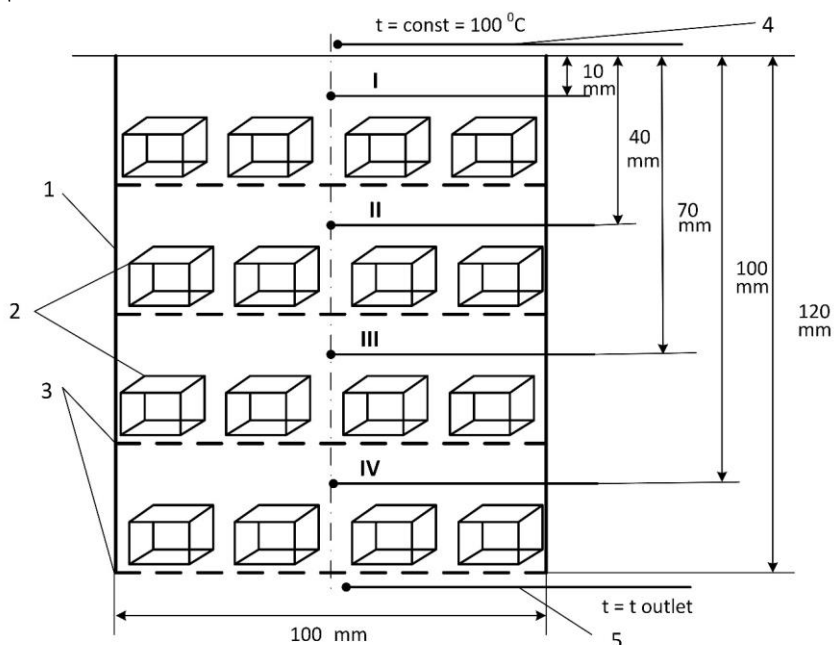


Fig. 1 Scheme of a container for filtration drying of candied fruits: 1 - body, 2 - candied fruits layers, 3 - grates, 4 - thermocouple at the container inlet, 5 - thermocouple at the container outlet; I - thermocouple above first layer of candied fruits, II - thermocouple above second layer of candied fruits, III - thermocouple above third layer of candied fruits, IV - thermocouple above fourth layer of candied fruits.

Рис. 1. Схема контейнера для фільтраційного сушіння цукатів: 1 - корпус; 2 - шари цукатів; 3 - решітки; 4 - термопара на вході в контейнер; 5 - термопара на виході з контейнера; I - термопара над першим шаром цукатів; II - термопара над другим шаром цукатів; III - термопара над третім шаром цукатів; IV - термопара над четвертим шаром цукатів

Корпус контейнера 1 (рис. 1) діаметром 0.1 м складається з чотирьох частин, які мають решітки 3. Стінки контейнера та решітки виготовлені з фторопласту. На вході та на виході з контейнера 1 під'єднані термопари 4 та 5 відповідно. Також до кожної з чотирьох частин контейнера 1 під'єднані термопари I–IV.

Підготовку до експерименту проводили наступним чином: на кожну з чотирьох решіток 3 цукати розкладали по 16 штук рівномірно в один шар. Такий метод розміщення цукатів сприяє рівномірному розподіленню теплового агенту, мінімізує гідравлічний опір шару. Зверху кожного шару встановлювали термопари, котрі були розміщені від верхнього краю контейнера наступним чином: термопара I – 10 мм, термопара II – 40 мм, термопара III – 70 мм, термопара IV – 100 мм (рис. 1). Термопара 4 зверху контейнера фіксувала сталу температуру теплового агенту на сушіння. Термопара 5 знизу контейнера фіксувала температуру теплового агенту на виході з контейнера.

Температуру по всій висоті шару, а також на вході та на виході фіксували восьмиканальним термоелектричним перетворювачем ПТ-108, який дає змогу виводити виміряні значення на персональний комп'ютер через 1.8 с. Зміну ваги контейнера з цукатами під час фільтраційного сушіння фіксували за допомогою електронної ваги AXIS-3000 (Китай) з точністю до 0.01 г.

Результати та їх обговорення

Результати кінетики сушіння цукатів,

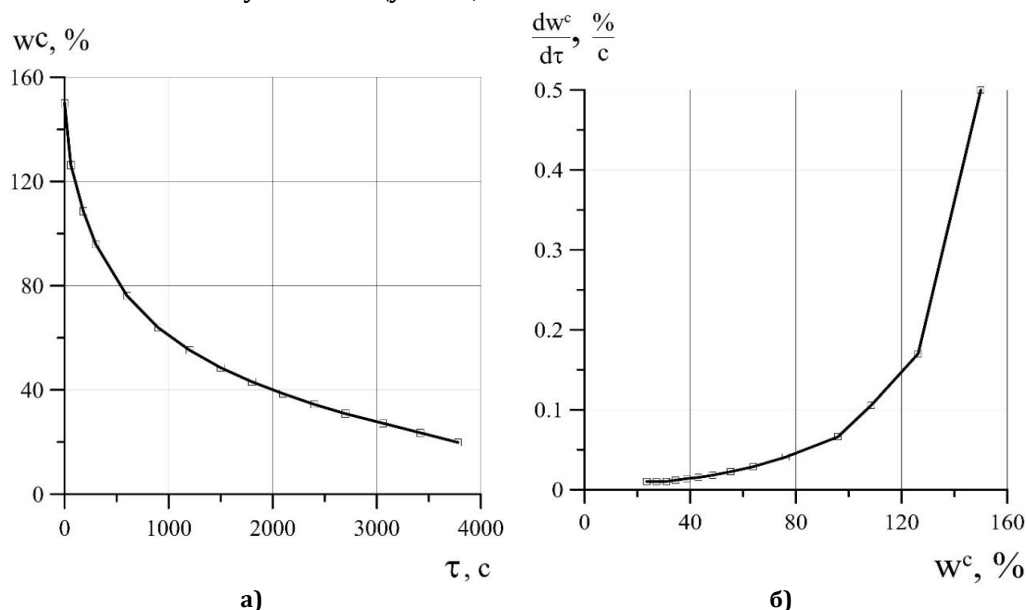


Рис. 2. Криві сушіння: а – кінетична крива сушіння; б – крива швидкості сушіння
Fig. 2. Drying curves: a – kinetic drying curve; b – speed drying curve

наведені на рис. 2а. Як видно з рис. 2а, цукати досягають кінцевої вологості, що відповідає 18 % за час 3780 с.

На рис. 2б зображена крива швидкості сушіння, на якій немає горизонтальної ділянки на початку процесу, що свідчить про відсутність періоду постійної швидкості сушіння. Тобто сушіння цукатів відбувається виключно в другому періоді, періоді спадаючої швидкості.

Як видно з рис. 2б, криву швидкості сушіння можна поділити на дві частини. Перша частина кривої (початок сушіння) відповідає видаленню капілярної вологи з поверхні міжклітинного простору. Швидкість сушіння на цій ділянці значно зменшується до певного критичного значення 120 %.

Друга частина кривої відповідає видаленню осмотично зв'язаної міжклітинної та клітинної вологи. Така волога видалається шляхом вибіркової дифузії через стінки клітин. Як видно з кінетичної кривої (рис. 2а) та кривої швидкості сушіння (рис. 2б) процес видалення осмотичної вологи є тривалим у часі. Якщо капілярна волога видалається приблизно за 100 с, то осмотично зв'язана – за 3680 с (рис. 2а)

У речовинах рослинного походження з клітинною будовою випаровування вологи відбувається з поверхні матеріалу, в середині волога переміщується в рідкому стані. Переміщення вологи в рідкому стані є лімітуючою стадією процесу, що часто супроводжується термодифузією. Саме тому сушіння цукатів є тривалим в часі.

Розглянемо зміну температури та вологовмісту теплового агенту на виході з шару матеріалу в часі (рис. 3а – 3б). На рис. 3а зображена зміна температури теплового агенту на виході з шару матеріалу. На рис. 3б зображена зміна вологовмісту теплового агенту на виході з шару матеріалу.

Зміна температури теплового агенту фіксується термопарою 5 (рис. 1), а зміна вологовмісту теплового агенту на виході з шару матеріалу розраховується з рівняння

матеріального балансу (1)

$$x_2 = \frac{1}{l} - x_1 \quad (1)$$

де $l = L/W$

x_1 – вологовміст повітря на вході в шар вологого матеріалу, $\text{кг}_{\text{вологи}}/\text{кг}_{\text{абсхпов}}$

L – витрата повітря на вході в шар вологого матеріалу, $\text{кг}/\text{с}$

W – кількість води, що виділяється з матеріалу, $\text{кг}/\text{с}$.

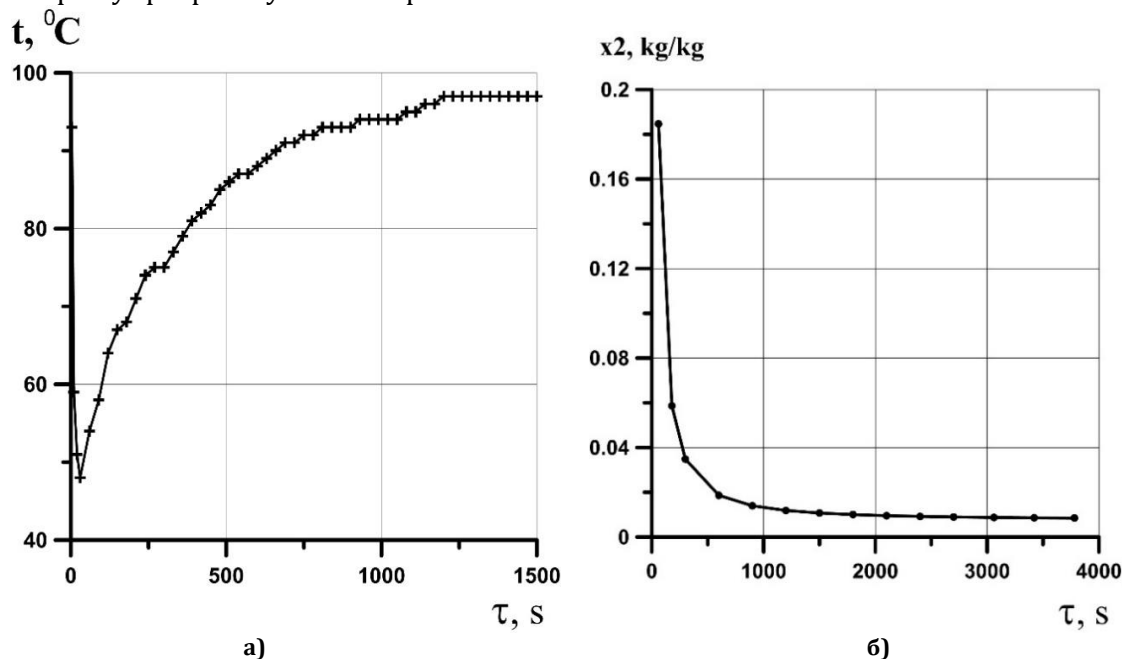


Рис. 3. Зміна параметрів теплового агенту на виході з шару матеріалу в часі: а – температури; б – вологовмісту

Fig. 3. Changing the parameters of the heat agent at the outlet of the material layer over time: a – temperature; b – moisture content

Як видно з рис. 3а, за перші 60 с тепловий агент максимально насичується вологою, про що свідчить те, що його температура падає до 48 °С. Протягом подальшого сушіння вологовміст теплового агенту буде поступово зменшуватися (рис. 3б), тобто насичення повітря вологою буде відбуватися повільніше. Після 1200 с температура теплового агенту на виході дорівнює температурі теплового агенту на вході (рис. 3а), що означає досягнення шаром матеріалу кінцевої вологості. Проте, як видно з рис. 2а, протягом 1200 с матеріал ще не досягає кінцевої вологості. Про це може свідчити форма зв'язку води з матеріалом. У період часу від 1200 до 3780 с з шару матеріалу видаляється виключно осмотично зв'язана вода. Така вода зосереджена здебільшого в середині клітин, починає видалятися шляхом дифузії після того, як виділилася капілярна вода. Під час видалення капілярної води температура поверхні матеріалу збільшується

протягом незначного проміжку часу і наближається до температури теплового агенту. Під час видалення осмотично зв'язаної води температура центру матеріалу буде також зростати, проте набагато повільніше.

Саме тому під час зміни температури теплового агенту на виході з шару матеріалу (рис. 3а) спостерігається те, що через 1200 с матеріал не приймає участі в теплообміні. Проте, з рис. 3б. видно, що через 1200 с повітря надзвичайно повільно, але продовжується насичуватися вологою, яка дифундує з середини матеріалу до його поверхні надзвичайно повільно. Під час такого незначного видалення води поверхня матеріалу та теплового агенту на виході буде лишатися незмінною, а вологовміст теплового агенту буде незначно, але зменшуватися.

Представимо рис. 3а – 3б у безрозмірному вигляді:

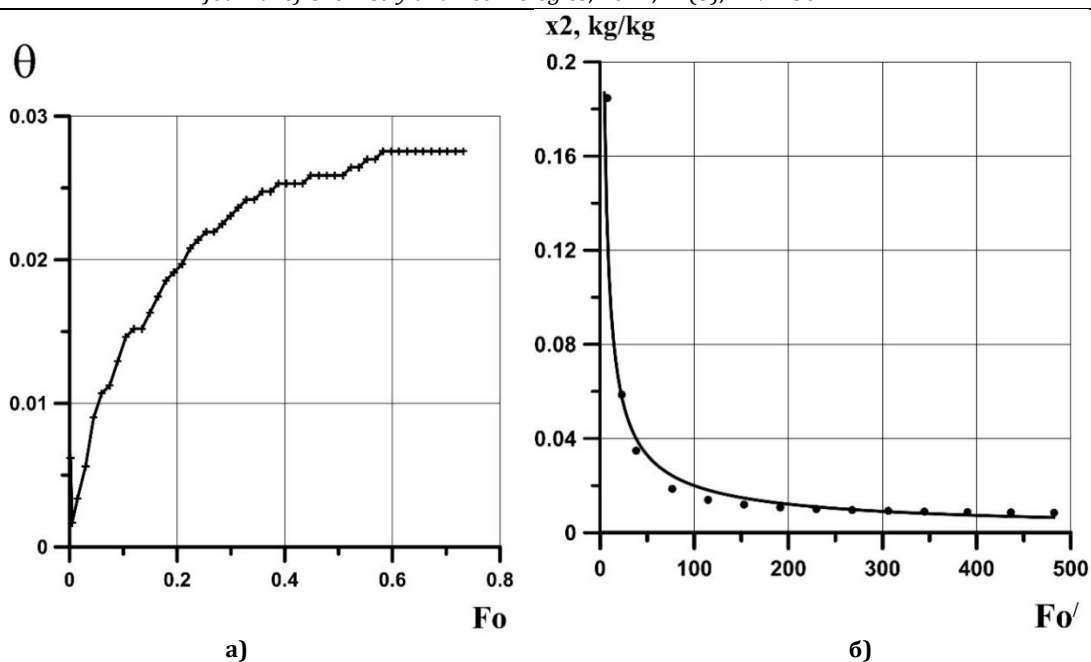


Рис. 4. Динаміка зміни параметрів теплового агента на виході з шару матеріалу в безрозмірних координатах: а – температури; б – вологовмісту
 Fig. 4. Dynamics of change of parameters of thermal agent at the exit from a material layer in dimensionless coordinates: a – temperature; b – moisture content

Отримаємо динаміку зміни температури теплового агента на виході з шару матеріалу в безрозмірних координатах (рис. 4а) та динаміку зміни вологовмісту теплового агента на виході з шару матеріалу в безрозмірних координатах (рис. 4б).

Безрозмірна температура (рис. 4а) розраховується:

$$\theta = \frac{t - t_{m.t.}}{T - t_{m.t.}},$$

де

t – температура теплового агента, °С;

$t_{m.t.}$ – температура мокрого термометра, °С;

T – температура матеріалу, °С.

Залежність зміни вологовмісту теплового агента на виході з шару матеріалу від дифузійного критерія Фур'є (рис. 4б) можна узагальнити наступною залежністю:

$$\frac{1}{l} - x_1 = x_2 = 0.55 \cdot (Fo')^{-0.72}, \quad (2)$$

де x_1 – вологовміст теплового агента на вході в шар матеріалу, $\text{кг}_{\text{вологи}}/\text{кг}_{\text{сух повітря}}$

x_2 – біжучий вологовміст теплового агента на виході в шар матеріалу, $\text{кг}_{\text{вологи}}/\text{кг}_{\text{сух повітря}}$

Виведене критеріальне рівняння (2) дає змогу розрахувати аналітично зміну вологовмісту теплового агента на виході з шару матеріалу в часі. Виведене рівняння підтверджують експериментальні дані сушіння цукатів з гарбуза з температурою 80 °С, тепловим агентом за 100 °С зі

швидкістю 2 м/с з похибкою $\pm 5\%$.

Розглянемо динаміку зміни температури та вологовмісту теплового агента по висоті шару матеріалу.

На рис. 5а зображено температурний профіль теплового агента під час сушіння, на рис. 5б – температурний профіль теплового агента під час сушіння в безрозмірних координатах.

Сушіння є теплообмінним процесом. Від внесеної кількості теплоти залежить швидкість сушіння. Саме тому матеріал з додатковим внесенням тепла підлягає сушінню за короткий час. На рис. 5а зображено графічну інтерпретацію зміни температури теплового агента по висоті та в часі. Тепловий агент надходить на сушіння з температурою 100 °С. Максимальне охолодження його можливе лише до значень температури мокрого термометра, який відповідає стану рівноваги між тепловим агентом та матеріалом. Проте, якщо матеріал сушиться виключно в другому періоді сушіння, тепловий агент насичується частково, починаючи з перших секунд сушіння. З рис. 5а бачимо, що в момент часу 100 с температура теплового агента в шарі на висоті 0.1 м, буде рівною 51 °С, що є мінімальною температурою під час насичення теплового агента вологою. В той самий момент часу, на висоті 0.07 м, температура теплового агента в шарі дорівнюватиме 72 °С, на висоті 0.04–97 °С, на висоті 0.01–99 °С. Отже

бачимо, що температура по висоті шару зменшується внаслідок втрат тепла на випаровування вологи. Протягом сушіння, як

видно з рис. 5а., відбувається аналогічний процес зменшення температури теплового агента по висоті шару матеріалу.

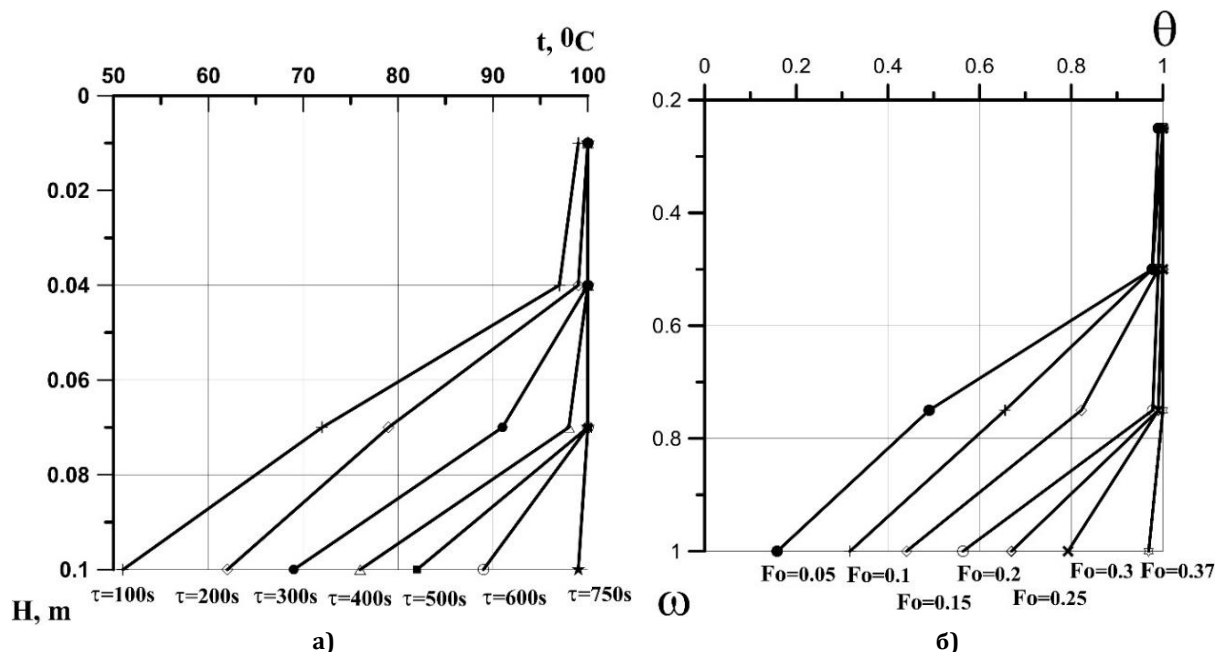


Рис. 5. Температурний профіль теплового агента під час сушіння: а - по висоті; б - в безрозмірних координатах

Fig. 5. Temperature profile of the heat agent during drying: a - height; b - in dimensionless coordinates

Можна спостерігати, що в момент часу приблизно 200 с з'являється шар висушеного матеріалу, який контактує з нагрітим теплоносієм і передає деяку частину тепла висушеним частинкам, зменшуючи за висотою температуру теплового агента. Якщо проаналізувати графічні залежності (рис. 2а, б), то можна побачити, що протягом приблизно 200 с вологовміст матеріалу досягає певного критичного значення, за якого починає видалятися осмотично зв'язана волога. З температурного профіля (рис. 5а) видно, що після 200 с така волога починає видалятися з верхнього шару матеріалу (на висоті 0.01 м). Це твердження виходить з того, що температура теплового агента на такій висоті в момент часу 200 с приблизно дорівнює температурі теплового агента на вході. Тепловий агент насичується осмотично зв'язаною вологою з матеріалу настільки повільно, що це майже не впливає на температуру теплового агента.

Аналогічне явище можна спостерігати по висоті і в інші моменти часу. Так, наприклад, в момент часу 750 с осмотично зв'язана волога видаляється з верхніх шарів і тільки в нижньому шарі (висота 0.1 м) можливе ще видалення капілярної вологи.

Отже, бачимо, що видалення осмотично

зв'язаної вологи є процесом лімітуючим під час сушіння. Тепловий агент тоді мінімально насичується вологою з матеріалу і тому не змінює свою температуру. Саме тому за температурним профілем теплового агента під час сушіння важко встановити, яким чином по висоті та в часі кожен шар матеріалу досягає рівноважної вологості.

На рис. 6а. зображено профіль вологовмісту матеріалу під час сушіння, на рис. 6б - профіль вологовмісту теплового агента під час сушіння.

Розглянемо профіль вологовмісту матеріалу під час сушіння (рис. 6а). Як видно з рис. 6а, в перші 100 с вологовміст матеріалу по висоті змінюється наступним чином: в шарі на висоті 0.01 м, вологовміст матеріалу дорівнює 74 %, на висоті 0.04 м вологовміст матеріалу дорівнює 85 %, на висоті 0.07 - 115 %, на висоті 0.1 - 150 %. Тобто, в нижньому шарі матеріалу видаляється здебільшого капілярно зв'язана волога, бо на такій висоті спостерігаємо, що вологовміст матеріалу є більшим за критичне значення ($w_{кр}^c = 120\%$). Також частина капілярно зв'язаної вологи буде видалятися і на висоті 0.07 м, оскільки вологовміст матеріалу є наближеним до критичного значення.

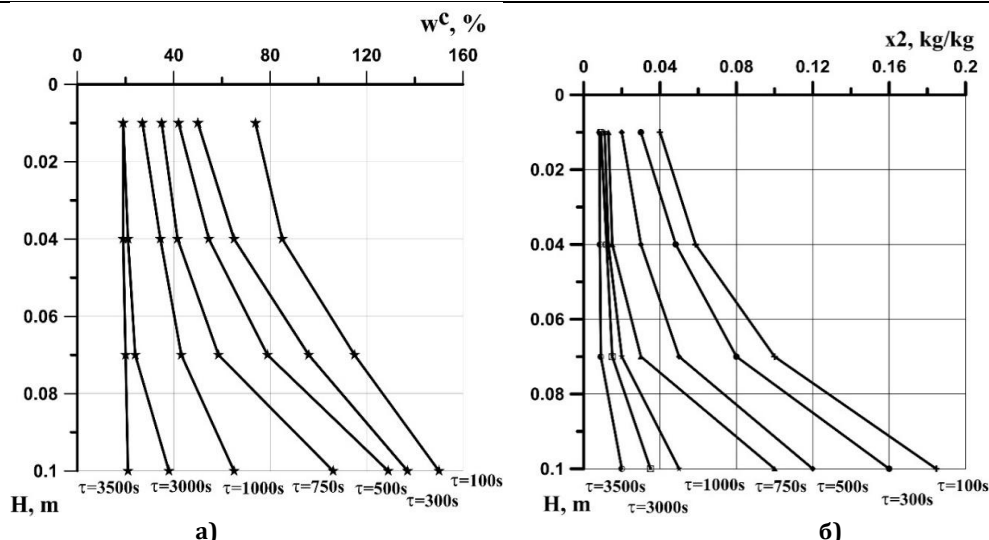


Рис. 6. Профіль вологовмісту під час сушіння матеріалу: а - матеріалу; б - теплового агенту
 Fig. 6. Moisture content profile during material drying: a - material; b - heat agent

З рис. 6а можна побачити, що з моменту часу 750 с з матеріалу буде видалятися осмотично зв'язана волога. Це видно з того, що по всій висоті матеріалу його вологовміст є меншим за $w_{кр}^c = 120\%$. До того ж в момент часу 750 с ще можливе видалення капілярно зв'язаної вологи, про що свідчить як температурний профіль (рис. 5а), так і злам на кривій в момент часу 750 с (рис. 6а), який вказує на більш інтенсивне видалення вологи з висоти матеріалу 0.07 м та 0.01 м.

Проаналізуємо зміну вологовмісту матеріалу в момент часу 1000 с, 3000 с, 3500 с. (рис. 6а). Починаючи від 1000 с, з рис. 2а – 2б, видно, вологовміст матеріалу прямує до свого кінцевого значення. Швидкість сушіння мала та прямує до певного постійного мінімального значення. Такий процес сушіння є лімітуючим, вологість матеріалу

зменшується надзвичайно повільно, що видно з профілів вологовмісту. Наприклад, в момент часу 3000 с вологовміст матеріалу по висоті зменшився від 37 до 20 %, а в момент часу 3500 с – від 21 до 19 %, що є кінцевою вологістю сушіння цукатів з гарбуза.

Аналогічно можна спостерігати профіль вологовмісту теплового агенту під час сушіння (рис. 6б). У перші 100 с тепловий агент насичується по висоті вологою від 0.04 до 0.18 кг/кг. У момент часу 1000 с – від 0.011 до 0.05 кг/кг. У момент часу 3500 с – від 0.0084 до 0.02 кг/кг.

На рис.7а. зображено профіль вологовмісту матеріалу під час сушіння в безрозмірних координатах, на рис. 7б – профіль вологовмісту теплового агенту під час сушіння в безрозмірних координатах.

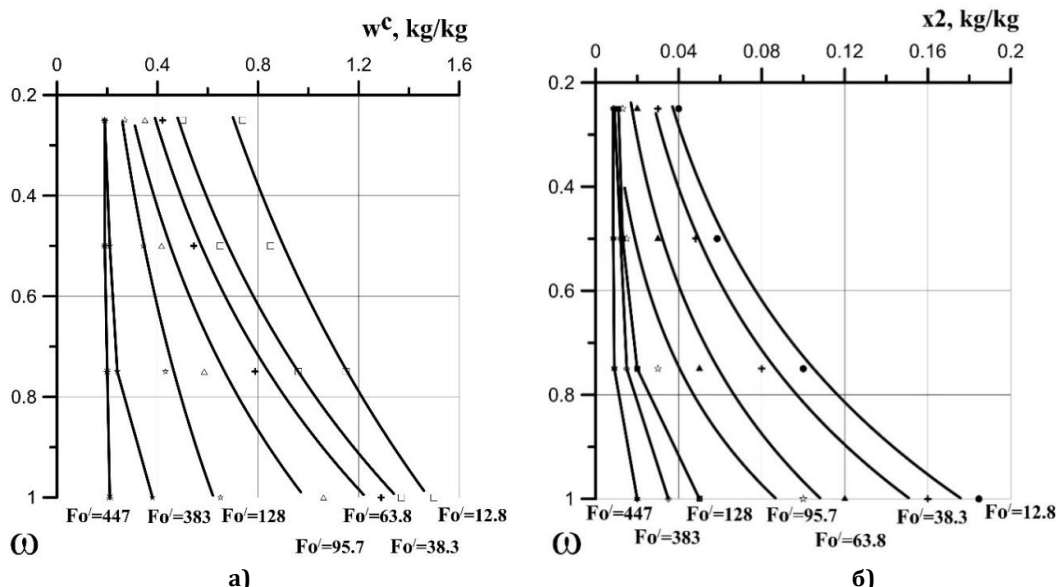


Рис. 7. Профіль вологовмісту під час сушіння в безрозмірних координатах: а - матеріалу; б - теплового агенту
 Fig. 7. Profile of moisture content during drying in dimensionless coordinates: a - material; b - heat agent

Динаміка процесу сушіння розглядає зміни вологовмісту теплового агенту та висушуваного матеріалу у шарі, в даному випадку під час періоду спадаючої швидкості. Приймається, що частинки мають форму паралелограму, монодисперсні і їх кінетичні параметри є ізотропними. У початковий момент часу вологовміст всіх частинок є однаковим і дорівнює w_0^c . У ході сушіння вологовміст частинок змінюється до кінцевого значення w_k^c . Тепловий агент поступає на сушіння з початковим вологовмістом x_1 . У процесі його проходження

через шар матеріалу його вологовміст зростає до стану насичення $x_{нас}$.

Задача динаміки сушіння у шарі монодисперсного матеріалу передбачає визначення полів зміни вологовмісту матеріалу та теплового агенту як функції координат і часу. Використовуючи безрозмірну координату ω та безрозмірний час Fo' , поле вологовмісту буде функцією цих параметрів:

$$x_2 = f(\omega, Fo')$$

Сформулюємо математичну модель процесу у вигляді диференціальних рівнянь:

$$-\frac{\partial}{\partial \tau}(8 \cdot \delta^3 \cdot \rho_w) = -D_w \cdot 24 \cdot \delta^2 \cdot \left(\frac{\partial x_m}{\partial r}\right)_{r=\delta} \cdot \rho_w \quad (4)$$

$$D \cdot \left(\frac{\partial x_m}{\partial r}\right)_{r=\delta} \cdot \rho_{air} = \beta \cdot (x_{m1} - x_2) \cdot \rho_{air} \quad (5)$$

$$v \cdot \left(\frac{\partial x_2}{\partial z}\right) \cdot \rho_{air} = -\frac{\rho_{as}}{\rho_s \cdot 8 \cdot \delta^3} \cdot D \cdot 24 \cdot \delta^2 \cdot \left(\frac{\partial x_m}{\partial r}\right)_{r=\delta} \cdot \rho_{air}, \quad (6)$$

де δ – еквівалентний радіус (половина товщини частинки паралелепіпеду), м;

ρ_w – густина води, кг/м³;

D_w – коефіцієнт дифузії води в середині частинки, м²/с;

x_{m1} – вологовміст матеріалу, кг_{води}/кг_{сухого} матеріалу;

r – біжучий еквівалентний радіус частинки, м;

D – коефіцієнт дифузії води в теплому агенті, м²/с;

ρ_{air} – густина теплового агенту, кг/м³;

β – коефіцієнт масовіддачі від поверхні твердої частинки до теплового агенту, м/с;

x_{m1} – вологовміст матеріалу на його поверхні, кг_{води}/кг_{сухого} матеріалу;

x_2 – біжучий вологовміст теплового агенту, кг_{води}/кг_{сухого} матеріалу;

v – дійсна швидкість теплового агенту, м/с;

z – висота шару матеріалу, м;

ρ_{as} – густина теплового агенту в стані насичення, кг/м³;

ρ_s – густина матеріалу, кг/м³.

Рівняння (4) є кінетичним рівнянням і характеризує швидкість переміщення фронту води всередині частинки. Рівняння (5) визначає граничну умову третього роду на границі тверде тіло – тепловий агент. Рівняння (6) характеризує зміни вологовмісту теплового агента по висоті шару матеріалу.

З рівнянь (4)–(6) бачимо, що вологовміст як теплового агенту, так і матеріалу буде

змінним під час сушіння в координатах і часі, що підтверджують як наведені рівняння, так і експериментальні дослідження. Така зміна мусить мати певний аналітичний розв'язок, який має підтверджуватися експериментальними дослідженнями.

Проведемо узагальнення експериментальних досліджень, результати яких наведені на рис. 7а, 7б.

Експериментально отримані криві профілю вологовмісту матеріалу (рис. 7а) та профілю вологовмісту теплового агенту (рис. 7б) під час сушіння апроксимуємо логарифмічною залежністю. Апроксимація проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10 (США). Отримані рівняння для розрахунку безрозмірної висоти в залежності від вологовмісту теплового агенту та безрозмірної висоти в залежності від вологовмісту матеріалу відображені в таблиці.

Як видно з таблиці, виведені рівняння цілком підтверджують динаміку зміни вологовмісту як матеріалу, так і теплового агенту по висоті шару (рис. 6–7).

Аналізуючи таблицю, можна стверджувати, що виведені рівняння цілком підтверджують динаміку зміни вологовмісту як матеріалу, так і теплового агенту по висоті шару (рис. 7а, б).

Рівняння для розрахунку безрозмірної висоти в залежності від вологовмісту теплового агенту та безрозмірної висоти в залежності від вологовмісту матеріалу

Table

Equations for calculation: dimensionless height depending on the moisture content of the heat agent; dimensionless height depending on the moisture content of the material

Fo/	$\omega(x_2) =$	$\Delta, \%$	$\omega(w^c) =$	$\Delta, \%$
12.8	$0.48 \cdot \ln(x_2) + 1.84$	1	$\ln(w^c) + 0.6$	2
38.3	$0.45 \cdot \ln(x_2) + 1.85$	1	$0.73 \cdot \ln(w^c) + 0.78$	0.5
63.8	$0.41 \cdot \ln(x_2) + 1.91$	3	$0.66 \cdot \ln(w^c) + 0.87$	2
95.7	$0.33 \cdot \ln(x_2) + 1.8$	11	$0.64 \cdot \ln(w^c) + 1$	4
128	-	-	$0.85 \cdot \ln(w^c) + 1.4$	2
383	-	-	-	-
447	-	-	-	-

Таке підтвердження впливає з того, що апроксимувати можливо лише ті профілі, де, як було описано вище, виділяється капілярно зв'язана волога. Це відбувається в період часу 750 с ($Fo = 95.7$). У період часу від 750 с ($Fo = 95.7$) до 1000 с ($Fo = 128$) виділяється в основному осмотично зв'язана волога, проте можливе вивільнення і капілярної вологи. Саме тому в момент часу 1000 с ($Fo = 128$) профілі вологовмісту матеріалу можна апроксимувати рівнянням, а апроксимація профілів вологовмісту теплового агенту рівнянням дає вже велику похибку і наближається до прямої лінії. Це пояснюється тим, що матеріал ще втрачає вологу, а тепловий агент в той самий час насичується вологою надзвичайно повільно. Протягом подальшого сушіння в момент часу 3000 с ($Fo = 383$), 3500 с ($Fo = 447$) профілі зміни вологовмісту як матеріалу, так і теплового агенту асимптотично наближаються до вертикальної лінії, що свідчить про досягнення матеріалом кінцевої вологості.

У наведених рівняннях (таблиця) похибка між експериментальними та апроксимованими значеннями не перевищує 11%. Рівняння (табл. 1) можуть бути використані в межах температур теплового агенту від 20 °C до 100 °C при швидкостях 1–4 м/с та за висоти шару до 150 мм. На основі рівнянь, наведених в табл. 1, виведемо залежність, яка б дала можливість встановити зв'язок між зміною вологовмісту матеріалу та теплового агенту:

$$\ln \left(\frac{(w^c)^k}{x_2^n} \right) = A \quad (7)$$

Залежність (7) дає змогу розрахувати вологовміст матеріалу та теплового агенту під час сушіння матеріалів, що підлягають сушінню в періоді спадаючої швидкості та з яких виділяється капілярно зв'язана волога. В

переважній більшості це є матеріали рослинного походження, яким і є цукат з гарбуза.

Узагальнення кінетики та динаміки сушіння, запропоновані в статті математичні моделі для розрахунку процесів сушіння цукатів з гарбуза та виведена в результаті узагальнень експериментальних значень залежність (7), можуть бути використані для проектування, інтенсифікації та оптимізації роботи сушильного обладнання.

Висновки

1. Досліджено кінетичні залежності зміни вологості цукатів з гарбуза та обґрунтовано форму зв'язку вологи з матеріалом. Досліджено зміну температури та вологовмісту теплового агенту в часі та в безрозмірних координатах та проведений аналіз експериментальних даних.

2. Встановлено динамічні залежності зміни вологості матеріалу, температури та вологовмісту теплового агенту по висоті шару матеріалу та в безрозмірних координатах та проведений їх аналіз. На основі аналізу встановлених динамічних залежностей, сформульовано задачу динаміки сушіння у шарі монодисперсного матеріалу, яка передбачає визначення полів зміни вологовмісту матеріалу та теплового агенту як функції координат і часу.

3. На основі задачі динаміки сушіння у шарі монодисперсного матеріалу частинок однакової форми паралелепіпеда виведені рівняння (4)–(6), які характеризують швидкість переміщення фронту вологи всередині частинки, зміну вологовмісту теплового агенту по висоті шару матеріалу та визначають граничну умову третього роду на межі тверде тіло – тепловий агент.

4. Шляхом узагальнення експериментальних даних виведена залежність (7), яка

дає змогу розрахувати вологовміст матеріалу та теплового агенту під час сушіння матеріалів, що підлягають сушінню в періоді

спадаючої швидкості, та з яких виділяється капілярно зв'язана волога.

References

- [1] Kindzera, D., Hosovskyi, R., Atamanyuk, V., Symak, D. (2021). Heat transfer process during filtration drying of grinded sunflower biomass. *Chemistry and Chemical Technology*, 15(1), 118–124. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.11>
- [2] Hosovskyi, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry and Chemical Technology*, 10(4), 460–463. <https://doi.org/10.23939/chcht10.04.459>
- [3] Atamanyuk, V., Gnativ, Z., Kinzera, D., Khusanov, A., Kaldybaeva, B. (2020). Hydrodynamics of cotton filtration drying. *Chemistry and Chemical Technology*, 14(3), 426–432. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.426>
- [4] Mykychak, B., Biley, P., Kindzera, D. (2013). External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer. *Chemistry and Chemical Technology*, 7(2), 191–195. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23508>
- [5] Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A. Zherebetskyi, R. R. (2021). Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillers tillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2021(4), 58–65. doi: 10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65
- [6] Snezhkin, Y. F., Paziuk, V. M., Petrova, Z. O., Tokarchuk, O. A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 61(2), 183–192. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-20>
- [7] Korinchuk, D. N., Snezhkin, Y. F. (2018). Simulation of the High-Temperature Drying of a Composite Mixture in an Air Drier for Production of a Biocombustible. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91(5), 1155–1164. doi: 10.1007/s10891-018-1844-6
- [8] Mykhailik, V. A., Snezhkin, Y. F., Dmitrenko, N. V. (2015). Investigation of the State of Water in Energy Trees in the Process of Drying by Differential Scanning Calorimetry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(5), 1093–1099. doi: 10.1007/s10891-015-1288-1
- [9] Mikhaïlik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snezhkin, Y. F. (2014). Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>
- [10] Sorokovaya, N. N., Snezhkin, Y. F., Shapar', R. A., Sorokovoi, R. Y. (2019). Mathematical Simulation and Optimization of the Continuous Drying of Thermolabile Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92(5), 1180–1190. doi: 10.1007/s10891-019-02032-3
- [11] Sorokova, N., Kolchik, O. (2019). Mathematical modeling of biomass drying dynamics. *Energy-efficiency in civil engineering and architecture*, 12, 42–50. <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.12.42-50>
- [12] Xiyang Li, Chungeng Yin (2019). A drying model for thermally large biomass particle pyrolysis. *Energy Procedia*, 158, 1294–1302. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.322>
- [13] Colauzzi, M., Serra, P., Amaducci, S. (2018). Variety earliness effect on field drying of biomass sorghum. *Biomass and Bioenergy*, 115, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombio.2018.04.011>
- [14] Conghui, Gu., Zhulin, Yu., Shanshan, S., Lei Guan, Kai Wu. (2018). Simulation investigation of drying characteristics of wet filamentous biomass particles in a rotary kiln. *Fuel Processing Technology*, 178, 344–352. doi: 10.1016/j.fuproc.2018.07.001
- [15] Nikitenko, N. I., Snezhkin, Yu. F., Sorokovaya, N. N. (2008). Development of a theory and methods for calculating the heat and mass transfer in drying a porous body with multicomponent vapor and liquid phases. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 81(6), 1153–1167. doi: 10.1007/s10891-009-0132-x
- [16] Nikitenko, N. I., Snezhkin, Yu. F., Sorokovaya, N. N., Kol'chik, Yu. N. (2006). Numerical method of simulation of the heat and mass transfer in different flow in a channel with penetrable walls. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79(3), 512–523. <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0129-7>
- [17] Nikitenko, N. I., Snezhkin, Yu. F., Sorokovaya, N. N. (2005). Mathematical simulation of heat and mass transfer, phase conversions, and shrinkage for optimization of the process of drying of thermolabile materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 78(1), 75–89. <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0032-7>
- [18] Nikitenko, N. I., Kol'chik, Yu. N., Sorokovaya, N. N. (2002). Canonical-element method for modeling hydrodynamics and heat and mass exchange in arbitrarily shaped regions. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 75(6), 74–80. <https://doi.org/10.1023/A:1022162825882>
- [19] Huzova, I. O., Atamanyuk, V. M. (2021). Mathematical interpretation of dynamics of temperature change during drying of hot monodisperse layer of organic raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(3), 278–288. <https://doi.org/10.15421/082030>
- [20] Huzova, I. (2020). Investigation of the energy-saving method during candied fruits filtration drying. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 64(4), 555–561. <https://doi.org/10.3311/PPch.15107>
- [21] Snezhkin, Y. F., Bileka, B. D. (2020). Use of Combined Cogeneration–Thermal Pumping Plants for Municipal Heat Power Engineering and Heat Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93, 376–383. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02131-6>
- [22] 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), 10–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81409>
- [23] Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z. (2018). Intensification of Drying Process During Activated Carbon Regeneration. *Chemistry & Chemical Technology*, 12(2), 263–271. <https://doi.org/10.23939/chcht12.02.263>

-
- [24] Gnativ, Z. Y., Ivashchuk, O. S., Hrynychuk, Y. M., Reutskyi, V. V., Koval, I. Z., Vashkurak, Y. Z. (2020). Modeling of internal diffusion mass transfer during filtration drying of capillary-porous material. *Academic Journals and Conferences*, 7(1), 22–28
- [25] Atamanjuk, V. M. (2007). [Gidrodynamika i teplomasoobmin pid chas fil'tracijnogo sushinnja dyspersnyh materialiv], L.: NU «LP». (in Ukrainian) doi: 10.23939/mmc2020.01.022