

UDC 664.292:547.458.88:66.083.2

STUDY OF MASS TRANSFER AND DIFFUSION PROCESSES OF SUCROSE INTO APPLE FRUIT PARTICLES

Iryna O. Huzova*, Volodymyr M. Atamanyuk

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

Received 4 May 2024; accepted 28 June 2024; available online 20 October 2024

Abstract

In this study, we designed a setup for blanching and saturating apple fruit particles with sucrose using a bubbling mode of sugar syrup with inert gas. For the saturation process, a sugar syrup was prepared at a temperature of 70 °C and a concentration of 60 % Brix. Based on photomicrographs of blanched fruit sections, we determined the average diameter and total length of channels between blanched apple cells to ascertain the particle's surface porosity, which was found to be 0.162 m²/m². According to the established mechanism for the saturation process, we justified the physical essence of saturation processes in the external and internal diffusion regions. We demonstrated that irregular saturation exists in the external diffusion region at the beginning of the process and saturation occurs during the period of constant velocity. In the internal diffusion region, there is a period of decreasing saturation velocity. We proved that effective diffusion coefficients depend on both the hydrodynamic conditions of the process and the saturation region. In the external diffusion region, the coefficient of effective diffusion is 100–200 times larger than in the internal diffusion region. We proposed to generalize the saturation process separately for the external and internal diffusion regions. Based on the generalization of experimental data, we derived analytical dependencies of sucrose concentration change in apple fruit particles over time for the external and internal diffusion regions. These dependencies enable the theoretical calculation of the amount of sucrose transferring into apple fruit particles in the internal and external diffusion regions. Additionally, we derived dimensional equations in the article, which enable the calculation of the mass transfer coefficient for laminar, turbulent, and transitional regimes of bubbling syrup with inert gas. Using these dimensional equations, the amount of sucrose transferring from the syrup into apple fruit particles via mass transfer can be determined.

Keywords: external diffusion; internal diffusion; mass feeder; candied fruit production; internal structure of the fruit; effective diffusion coefficient.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОВІДДАЧІ ТА ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЦУКРОЗИ В ЧАСТИНКИ ПЛОДУ ЯБЛУКА

Ірина О. Гузьова, Володимир М. Атаманюк

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

Анотація

У роботі спроектовано установку для бланшування та насичення цукрозою частинок плоду яблука в режимі барботування цукрового сиропу інертним газом. Для процесу насичення підготовлено цукровий сироп з температурою 70 °C та концентрацією 60 % Brix. На основі фото зрізів бланшованих плодів визначено середній діаметр та загальну довжину каналів між клітинами бланшованого яблука, і, відповідно, поверхневу поруватість частинок – 0.162 м²/м². Розроблено механізм процесу насичення на основі залежності швидкості насичення плодів яблука від часу. Це обґрунтовує фізичний зміст процесів насичення в зовнішньо- та внутрішньодифузійній областях. Доведено, що в зовнішньодифузійній області існує нерегулярне насичення на початку процесу та насичення в періоді постійної швидкості. У внутрішньодифузійній області існує період спадаючої швидкості насичення. Доведено, що ефективні коефіцієнти дифузії залежать як від гідродинамічних умов процесу, так і від області насичення. В зовнішньодифузійній області коефіцієнт ефективної дифузії є більшим, ніж у внутрішньодифузійній, в 100–200 разів. Авторами статті запропоновано проводити процеси насичення окремо для зовнішньо- та внутрішньодифузійної області. На основі узагальнення експериментальних даних виведені аналітичні залежності зміни концентрації цукрози в частинках плодів яблука в часі для зовнішньодифузійної та внутрішньодифузійної області. Виведені залежності дають змогу теоретично розрахувати кількість цукрози, яка переходить в частинку плоду яблука у внутрішньо- та зовнішньодифузійній областях. Також виведені критеріальні рівняння для розрахунку коефіцієнту масовіддачі для ламінарного, турбулентного та перехідного режимів барботування сиропу інертним газом. За допомогою критеріальних рівнянь можна визначити кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду яблука шляхом масовіддачі.

Ключові слова: зовнішня дифузія; внутрішня дифузія; масовіддача; виробництво цукатів; внутрішня структура плоду; ефективний коефіцієнт дифузії.

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

Вступ

Виробництво цукатів як в Україні, так і за кордоном є актуальним. Серед розчинних речовин найкращим консервантому виробництві цукатів є цукор. У статті [1] доведено, що екстракти, отримані з зацукрованого помело, майже не втрачають свій природний вітамінний комплекс, зберігають антиоксидантні властивості. Крім того, цукроза запобігає окиснювальній дії та зберігає біологічну активність готового продукту. В роботі [2] досліджується вплив процесів бланшування, насичення цукрозою та сушіння на вміст пестицидів у зразках кумквату. Доведено, що усі перелічені процеси значно знижують вміст пестицидів в цукатах з кумквату. В роботі [3] доведено, що на якісну структуру зацукрованих слив впливають точні параметри зрілості. В роботі [4] вивчається процес насичення плодів манго розчинними речовинами та натуральними ароматизаторами. Доведено, що осмотичний тиск в розчині є прямопропорційним його концентрації та значно впливає на швидкість процесів насичення.

В роботі [5] вивчається процес насичення частинок плодів папаї кубічної форми розчином цукрози. В роботі [6] вивчається процес насичення плодів яблука буряковим соком 50 % Brix за різних температур соку. В роботах [5; 6] доведено, що під час насичення кубики з папаї та клиноподібної форми частинки плодів яблука втрачають до 50 % свого об'єму. Визначається коефіцієнт дифузії на основі 3D-моделювання та доводиться, що визначений теоретично коефіцієнт дифузії, із знехуванням процесу зменшення об'єму, є більшим приблизно на 20–25 % у порівнянні з експериментально отриманим. В роботах [5–8] доведено значний вплив концентрації розчинів, температури та геометричної форми частинок на перебіг дифузійних процесів та на значення коефіцієнтів дифузії. В роботах [8; 9] також підкреслена важливість створення теоретичних моделей з врахуванням форми розміру та усадки зразків папаї та дині під час насичення їх розчинними речовинами, а також під час їх зневоднення [9]. В роботі [10] доведено, що під час насичення шматків томатів напівеліптичної форми як цукрозою, так і розчином NaCl, враховуючи процеси усадки, реальні коефіцієнти дифузії будуть меншими, ніж теоретично розраховані.

Завдяки водним розчинам цукрози відбувається значна дегідратація частинок

харчової рослинної сировини [11–13]. В роботі [11] розглядається дегідратація плодів ківі, в роботі [12] розроблена модель дегідратації з твердотільного зразка. В роботі [13] доведено, що оптимальним для дегідратації банана є обробка сиропом з концентрацією 45 % Brix та подальшим сушінням за температури 60 °C. В роботах розглянуті процеси дегідратації та розроблені математичні моделі видалення вологи під час профільтрування теплового агенту крізь шар рослинної сировини [14–16]. Також авторами вказано, що після дегідратації за певних оптимальних умов зберігаються антиоксидантні властивості готових продуктів [17–19] і на прикладі полуниці та грибів доведено, що антиоксидантні властивості зберігаються після обробки озоном та холодною плазмою [20–21].

Отже, з огляду джерел літератури: основним етапом у виробництві цукатів є насичення харчової рослинної сировини розчинними речовинами. Процес насичення має відбуватися за заздалегідь встановлених гідродинамічних умов, температури та концентрації розчину. Також важливим є розмір, форма та внутрішня структура частинок харчової рослинної сировини для виробництва цукатів. Усі перелічені фактори будуть впливати на величину ефективного коефіцієнта дифузії, швидкість перебігу дифузійних процесів, а також на якість та органолептичні властивості готового продукту. Оптимально встановлені умови також сприятимуть скороченню часу насичення та, як наслідок, скороченню енергозатрат на процеси насичення та дегідратації.

Метою даної роботи є встановлення механізму дифузійних процесів цукрози в середину частинок плоду яблука, визначення ефективних коефіцієнтів дифузії та коефіцієнтів масовіддачі теоретичним та експериментальним шляхами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- спроектувати установку для бланшування та насичення цукрозою частинок плоду яблука;
- визначити на основі фото зрізів бланшованих плодів поверхневу пористість;
- встановити залежність швидкості насичення плодів яблука в часі та на основі залежностей розробити механізм процесів насичення;

• на основі експериментальних даних та теоретичних гіпотез визначити ефективні коефіцієнти дифузії та масовіддачі.

Експериментальна частина

Об'єктами дослідження були частинки плоду яблука сорту «Семеренко». Яблука мили,

очищали від шкірки та насіння та формували зразки кубічної форми з ребром 15 мм (± 2 мм) та масою 1.6 г (± 0.2 г) в кількості 40 шт. Для визначення зміни концентрації цукрози в частинках проводили експеримент на установці, зображеній на рис. 1.

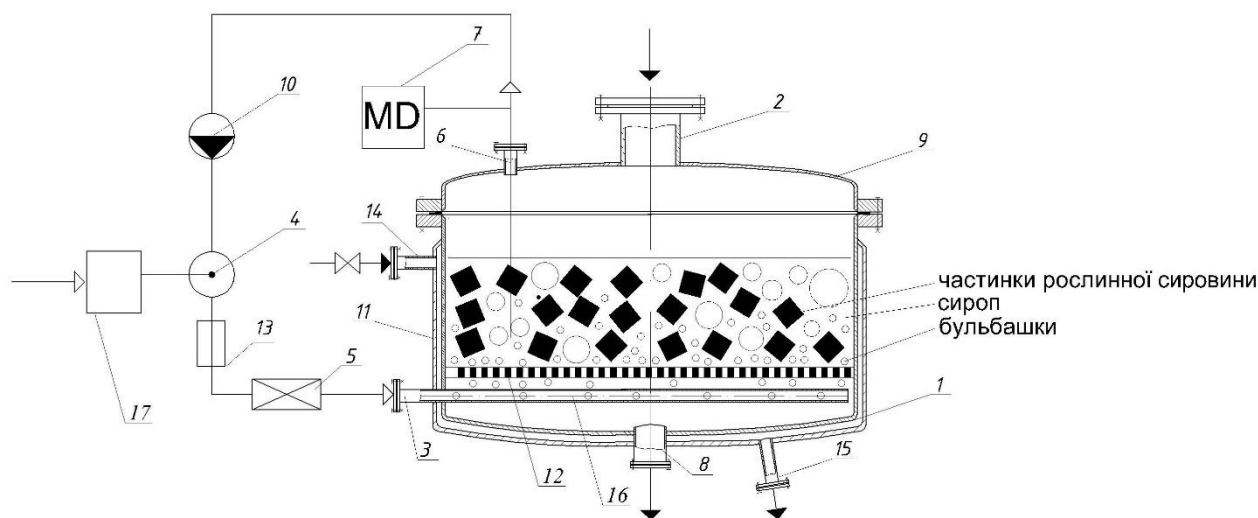


Fig. 1. Scheme of setting the saturation of particles of food plant raw materials with sucrose

1 - housing made of food grade steel (diameter 200 mm, height 140 mm); 2 - fitting for supplying water, sugar syrup and apple fruit particles; 3 - compressed inert gas supply nozzle; 4 - fan; 5 - heater with temperature regulator; 6 - nozzle for inert gas outlet; 7 - device for measuring syrup temperature; 8 - fitting for draining water and syrup; 9 - cover; 10 - drip deflector; 11 - shell; 12 - grid; 13 - flow meter; 14 - nozzle for feeding saturated water vapor into the shell; 15 - outlet for condensate; 16 - drainage plate; 17 - inert gas preparation system

Рис. 1. Схема установки насыщения частинок пищевой растительной сырья сахарозой

1 - корпус з харчової сталі (діаметр 200 мм, висота 140 мм); 2 - штуцер для подачі води, цукрового сиропу та частинок плоду яблука; 3 - патрубок подачі стиснутого інертного газу; 4 - вентилятор; 5 - калорифер з регулятором температури; 6 - патрубок для виходу інертного газу; 7 - прилад для вимірювання температури сиропу; 8 -штуцер для зливу води та сиропу; 9 - кришка; 10 - краплевідбійник; 11 - оболонка; 12 - решітка; 13 - витратомір; 14 - патрубок для подачі насиченої водяної пари в оболонку; 15 - патрубок для виходу конденсату; 16 - дренажна тареля; 17 - система підготовки інертного газу

Першим етапом досліджень було бланшування. У корпус 1 через штуцер 2 заливали воду до нижнього рівня решітки 12. В оболонку 11 патрубком 14 подавали насичену водяну пару для нагріву води в корпусі 1 до стану випаровування. Коли насичена водяна пара повністю заповняла корпус 1, в нього завантажували сформовані частинки плоду яблука. Таким чином частинки піддавали бланшуванню 5 хв.

Одну частинку вилучали з установки для визначення її поверхневої пористості ($m, m^2/m^2$). З частинки брали зрізи та препарували згідно з загальноприйнятою методикою [22-23]. Зразки аналізували за допомогою світлового мікроскопа Leica DM-2500 (Switzerland). Фото робили з використанням камери Leica DFC450C та програмного забезпечення Leica Application Suite Version 4.4 [Build:454] Leica Microsystems (Switzerland) Limited та аналізували за

допомогою програми Aperio Image Scope [v12.4.3.5008]. За допомогою програми визначали середній діаметр та загальну довжину каналів між клітинами на певній площі фрагменту клітини бланшованого яблука.

Другим етапом досліджень було насичення частинок яблука цукрозою в режимі барботування. У корпус 1 з бланшованими частинками плоду яблука через штуцер 2 заливали заздалегідь підготовлений цукровий сироп з температурою 70 °C та концентрацією 60 % Brix. Температура та концентрація сиропу обрані на основі попередньо проведених досліджень, результати яких наведені в літературі [22-24]. Об'ємне співвідношення частинок до сиропу становило 1:5. За умови такого співвідношення концентрація цукрози в сиропі не змінюється протягом загального часу насичення. Решітка 12 була повністю занурена в сироп.

Далі, вентилятором 4 в об'єм сиропу під решітку 12 через патрубок 3 подається інертний газ, який барботує сироп за допомогою дренажної тарелі 16. Дренажна тареля 16 необхідна для рівномірного розподілу та барбовування інертного газу. Витрата інертного газу фіксується витратоміром 13. Нагрівається інертний газ до температури сиропу за допомогою калорифера 5. Під час барботування газ виходить з корпусу 1 через патрубок 6, проходить краплевідбійник 6 та, змішуючись зі свіжим інертним газом, який подається з системи підготовки 17 вентилятором 4, подається на барботування.

Під час барботування сиропу інертним газом відбувався процес насичення частинок бланшованого яблука цукрозою. Зміну

концентрації цукрози в частинках плоду яблука вимірювали наступним чином. Частинку виймали з зони насичення, сироп із поверхні частинки видаляли фільтрувальним папером, зважували, вичавлювали з неї 1 краплю соку на призму рефрактометра НТ118 (0–80 % Brix) та визначали цукристість.

Результати та їх обговорення

Фотографії зразків (збільшення в 1000 разів) бланшованого яблука наведені на рис. 2. З фото, що зображені на рис. 2а було визначено діаметр каналів між клітинами (d_i , мкм, 14 вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами бланшованого плоду яблука ($D_{сер}$, мкм). З рис. 2б визначали довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 21 вимір) та загальну довжину каналів між клітинами бланшованого яблука (L , мкм).

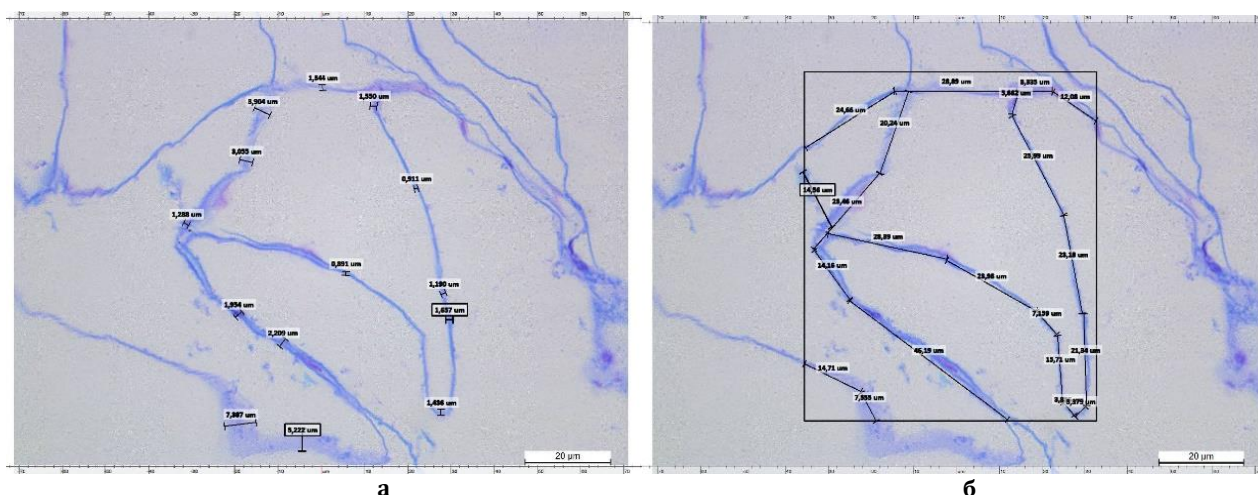


Fig. 2. Photos of the main tissue of a blanched apple fruit with determination of the average diameter of channels between cells (a) and the total length of channels between cells (b)

Рис. 2. Фотографії основної тканини плоду бланшованого яблука із визначенням середнього діаметра каналів між клітинами (а) та загальної довжини каналів між клітинами (б)

Результати вимірювання та розрахунків:

$$S_{пустот} = D_{сер} \cdot L = 907 \text{ мкм}^2, S_{заг} = 5581.92 \text{ мкм}^2$$

$$D_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=14} d_i = 2,43 \text{ мкм}, L = \sum_{i=1}^{n=21} l_i = 373,49 \text{ мкм}$$

$$m = \frac{S_{пустот}}{S_{заг}} = \frac{L_{заг} \cdot D_{сер}}{S_{заг}} = 0,162 \text{ м}^2 / \text{м}^2$$

Результати експериментальних досліджень процесу насичення цукрозою

частинок бланшованого плоду яблука в режимі барботування наведені на рис. 3.

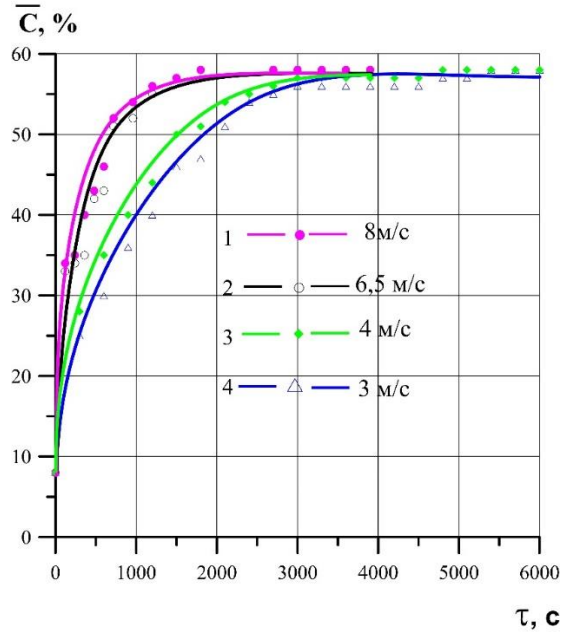


Fig. 3. Dependence of changes in sucrose concentration in apple fruit particles over time under the conditions of bubbling syrup with an inert gas at a temperature of 70 °C. At the speed of bubbling: 1 – 8 m/s; 2 – 6.5 m/s; 3 – 4 m/s; 4 – 3 m/s.

Рис. 3. Залежність зміни концентрації цукрози в частинках плодів яблук в часі за умов барботування сиропу інертним газом температурою 70 °C. За швидкості барботування: 1 – 8 м/с; 2 – 6.5 м/с; 3 – 4 м/с; 4 – 3 м/с.

Як видно з рис. 3, з ростом швидкості подачі газу на барботажах зменшується час насичення цукрозою частинок плоду яблука. На початку процесу насичення концентрація цукрози в частинках зростає швидше до певного моменту часу, далі концентрація починає

зростати повільніше. Для більш точного аналізу процесу насичення частинок в режимі барботування, наведемо графіки залежності швидкості насичення від зміни концентрації (рис. 4а) та в часі (рис. 4б).

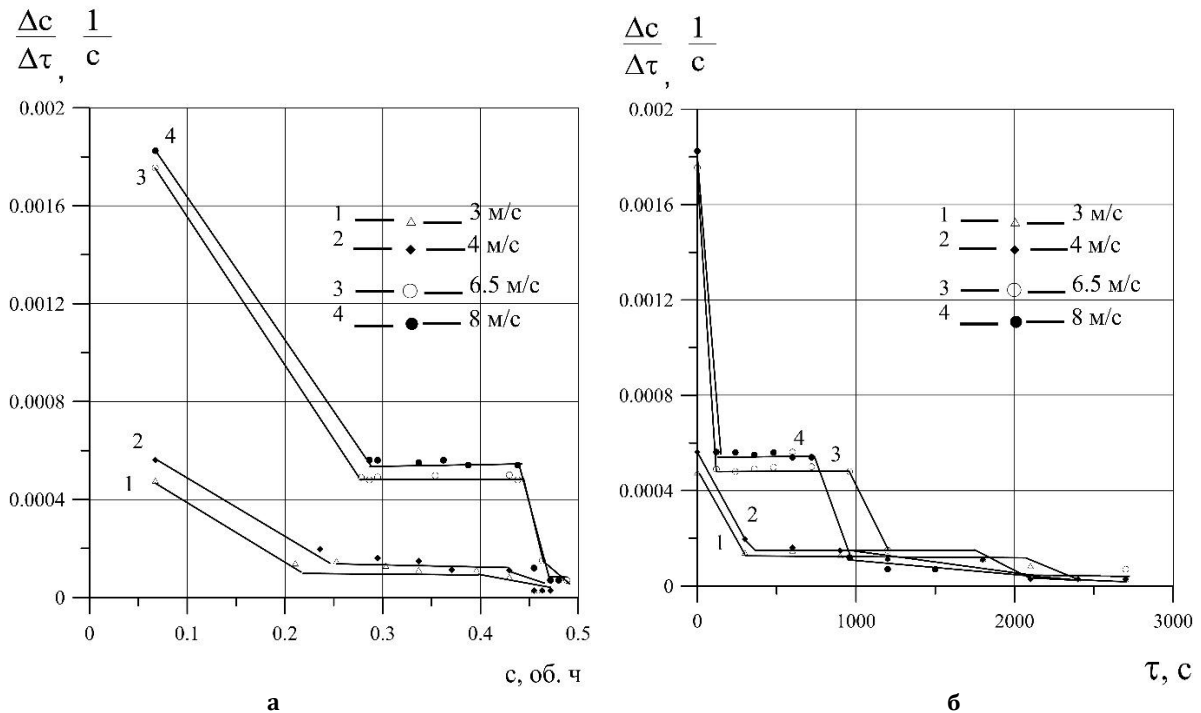


Fig. 4. Dependence of changes in the rate of saturation ($\Delta c/\Delta \tau$) of apple fruit particles with sucrose on: a – changes in concentration (vol. h); b – time (s)

Рис. 4. Залежність зміни швидкості насичення ($\Delta c/\Delta \tau$) частинок плоду яблука цукрозою від: а – зміни концентрації (об. ч.); б – часу (с)

Як видно з рис. 4., усі криві можна умовно розділити на три ділянки. *Перша ділянка* – на початку процесу насичення відбувається значне зменшення швидкості насичення. На цьому етапі відбувається дифузія цукрози з сиропу до межі розділу фаз «об'єм розчину цукрози – пориста частинка плоду рослинної сировини» – *перша стадія насичення*. Насичення пор та каналів волокнистої структури тканини бланшованого плоду – *друга стадія насичення*. Ці дві стадії характеризуються значним падінням швидкості насичення та значним зростанням концентрації цукрози в частинці протягом незначного проміжку часу (рис. 4). Так, за умови швидкості подачі газу 6.5 м/с, швидкість насичення зменшується майже в 4 рази, а концентрація цукрози в частинці зростає більше, ніж в 2.5 разів (рис. 4.).

Друга ділянка, як видно з рис. 4., характеризується постійною швидкістю насичення. Вона відповідає *третьої стадії насичення*, що характеризується заповненням цукрозою мікрокапілярів (міжклітинників), які є приблизно співрозмірними між собою. Зростання швидкості інертного газу з 4 м/с до 6.5 м/с значно збільшує швидкість насичення. Наприклад, за швидкості інертного газу 4 м/с швидкість насичення становить $1.5 \cdot 10^{-4}$ об.ч/с, а за швидкості інертного газу 6.5 м/с – $4.5 \cdot 10^{-4}$ об.ч/с, тобто зростає в 4 рази. Час насичення на другій ділянці зменшується із зростанням швидкості подачі інертного газу (рис. 4б).

Третя ділянка на кривих (рис. 4.) відповідає *четвертій стадії насичення*, стадії спадаючої швидкості насичення. Тут відбувається перехід розчину цукрози в об'єм зруйнованої клітини та дифузія в ній дрібними міжклітинниками, що утворилися в результаті бланшування цілісної клітини.

Отже бачимо, що процес дифузії цукрози в частинки плоду яблука можна розділити на чотири стадії, перші три з яких відповідають зовнішньодифузійній області, а четверта – внутрішньодифузійній області. Перші дві ділянки кривої (рис. 4) – зовнішньодифузійна область, причому друга ділянка відповідає постійній швидкості насичення. Третя ділянка кривої (рис. 4) – внутрішньодифузійна область, що відповідає спадаючій швидкості насичення.

Для подальшого узагальнення процесу дифузії цукрози з її водного розчину в об'єм частинки яблука введемо позначення тривалості кожної стадії насичення:

τ_n – тривалість першої та другої стадії насичення, с;

$\tau_{lim} - \tau_n$ – тривалість третьої стадії насичення, с;

τ_{lim} – граничний час насичення (тривалість перших трьох стадій насичення) – час насичення в зовнішньодифузійній області, с;

$\tau_k - \tau_{lim}$ – тривалість четвертої стадії насичення – час насичення в внутрішньодифузійній області, с;

τ_k – тривалість процесу насичення до встановлення рівноважної концентрації цукрози в частинці плоду яблука, с.

Також введемо поняття граничної концентрації цукрози в частинці (c_{lim}), яка відповідає часу насичення в зовнішньодифузійній області (τ_{lim}) та концентрації цукрози в частинці (c_n), яка відповідає тривалості першої та другої стадій насичення (τ_n).

Аналізуючи криві зміни швидкості насичення (рис. 4), можна зробити висновок, що, як в часі, так і за довжиною зразка частинки плоду яблука коефіцієнт дифузії не буде однаковий, оскільки діаметри пор, каналів та капілярів між клітинами не є однаковими. В такому разі дамо назву коефіцієнтові дифузії – *ефективний коефіцієнт дифузії* та розрахуємо його для всіх стадій насичення.

Розрахунок ефективного коефіцієнту дифузії проводили на основі першого закону Фіка [25].

Для перших двох стадій насичення рахуємо ефективний коефіцієнт дифузії навколо частинки.

$$D_n = \frac{V_n}{F} \left/ \frac{c_n - c_0}{R} \right., \quad (1)$$

де V_n – об'єм цукрози, яка продифундувала з сиропу в частинку протягом перших двох стадій насичення, м³/с;

F – зовнішня площа поверхні частинки, м²;

R – еквівалентний радіус частинки, м.

В тріщинках частинки, а також в порах і каналах волокнистої структури тканини бланшованого плоду зміну коефіцієнту дифузії будемо вважати наближеною до коефіцієнта дифузії навколо частинки.

Розрахуємо ефективний коефіцієнт дифузії в періоді постійної швидкості насичення (третя стадія насичення):

$$D_{m-1} = \frac{m \cdot V_I}{F} \left/ \frac{c_{lim} - c_n}{R} \right., \quad (2)$$

де V_I – об'єм цукрози, яка продифундувала з сиропу в частинку протягом третьої стадії насичення, m^3/c ;

m – поверхнева пористість бланшованої частинки плоду яблука, m^2/m^2 .

Розрахуємо ефективний коефіцієнт дифузії у внутрішньодифузійній області (в періоді спадаючої швидкості насичення, четверта стадія насичення):

$$D_{m-II} = \frac{m \cdot V_{II}}{F} \left/ \frac{c^* - c_{lim}}{R} \right., \quad (3)$$

де V_{II} – об'єм цукрози, яка продифундувала з сиропу в частинку протягом четвертої стадії насичення, m^3/c .

Результати розрахунків ефективних коефіцієнтів дифузії представлені в таблиці 1.

Table 1

Results of calculations of effective diffusion coefficients for the external and internal diffusion region during saturation in syrup bubbling mode with inert gas (saturation temperature 70°C)

Таблиця 1

Результати розрахунків ефективних коефіцієнтів дифузії для зовнішньої та внутрішньої дифузійної області під час насичення в режимі барботування сиропу інертним газом (температура насичення 70°C)

ω , м/с	D_n , m^2/c	$D_{m,I}$, m^2/c	$D_{m,II}$, m^2/c
3	$1.86 \cdot 10^{-7}$	$3.64 \cdot 10^{-9}$	$1.98 \cdot 10^{-9}$
4	$1.86 \cdot 10^{-7}$	$4.37 \cdot 10^{-9}$	$2.18 \cdot 10^{-9}$
6,5	$4.67 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$3.77 \cdot 10^{-9}$
8	$4.67 \cdot 10^{-7}$	$10.92 \cdot 10^{-9}$	$6.07 \cdot 10^{-9}$

З таблиці 1 видно, що коефіцієнт ефективної дифузії збільшується з ростом швидкості інертного газу. Також бачимо, що в зовнішньодифузійній області коефіцієнт ефективної дифузії є більшим, ніж у внутрішньодифузійній області. В першій та другій стадіях насичення коефіцієнт ефективної дифузії в 100–200 разів більший, ніж у третій стадії насичення. Це пояснюється величиною еквівалентного радіусу самої частинки, а також діаметром тріщинок, пор, каналів волокнистої структури тканини бланшованого плоду, які є в сотні разів більші, ніж діаметри мікрокапілярів між бланшованими клітинами та всередині самих бланшованих клітин.

Також з таблиці 1 видно, що у внутрішньодифузійній області коефіцієнт ефективної дифузії є найменшим. Це пов'язано з тим, що четверта стадія насичення є лімітуючою стадією з найменшим насиченням цукрозою внутрішньої структури бланшованої частинки.

Скороченню часу насичення частинок із збільшенням швидкості подачі газу на барботування сприяє те, що опір масообміну зазвичай зосереджений у зовнішньому пограничному шарі. Тому велике значення має гідродинаміка навколо частинки. Відомо [22–24], що навколо частинки масоперенесення відбувається як шляхом молекулярної дифузії (процес залежить від природи середовища), так і шляхом масовіддачі (процес залежить від товщини пограничного шару навколо частинки). Зменшенню товщини пограничного шару та скороченню часу

насичення буде сприяти збільшення швидкості подачі газу на барботажи, що підтверджується результатами експериментів (рис. 3).

Кінетику дифузійних процесів описує другий закон Фіка [23–24].

Для узагальнення результатів в роботі використовували перетворення диференціального рівняння масообміну в рухомому середовищі методами теорії подібності [22].

Проведемо узагальнення процесів насичення частинок плодів яблука цукрозою. Розглянемо процеси, які відбуваються на межі розділу фаз, тобто у зовнішньому пограничному шарі навколо частинки.

На межі розділу фаз одночасно відбуваються процеси масовіддачі та молекулярної дифузії [22]:

$$\beta \cdot (c - c_n) = -D_n \cdot \frac{dc}{dn} \quad (4)$$

Коефіцієнт масовіддачі розраховують згідно з рівнянням:

$$\beta = \frac{V_n}{F \cdot (c - c_n)} \quad (5)$$

Згідно з теорією подібного перетворення рівнянь, виведемо з рівняння (4) критерій Шервуда конкретно для процесу насичення частинок плодів кабачка цукрозою:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D_n} \quad (6)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі від середовища цукрового сиропу до границі розділу фаз «сироп – частинка плоду яблука», m/c ;

d_e – еквівалентний діаметр частинки плоду яблука ($d_e = 4F/P$), м;

P – змочуваний периметр поверхні частинки, м.

У рівняння (6) входить коефіцієнт масовіддачі β , який є усередненим для всієї зовнішньої частинки плоду яблука кубічної форми.

Як відомо з теорії подібності [22], для узагальнення масообмінних процесів

необхідним чинником є дотримання гідродинамічної подібності

Оскільки критерій Шмідта (Sc) для процесів насичення, зображених на рис. 3, є сталим, для узагальнення введемо критерій Пекле дифузійний ($Pe_d = Re \cdot Sc$).

Результати експериментальних досліджень, які зображені на рис. 3., узагальнені на рис. 5., де наведена критеріальна залежність $Sh = f(Pe)$.

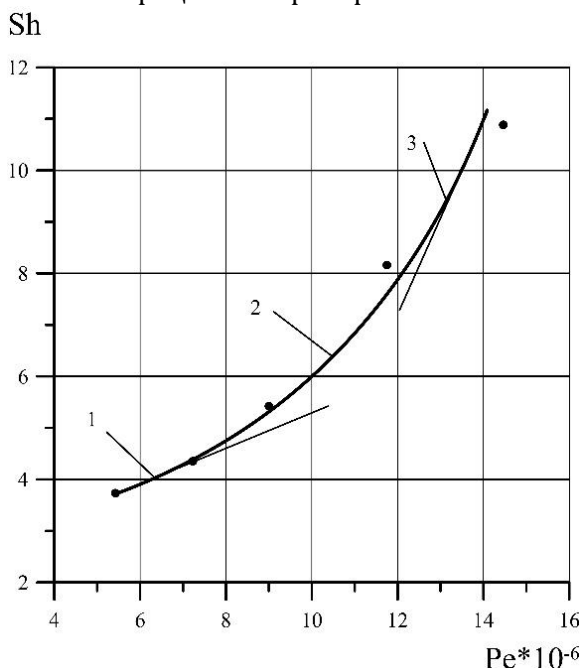


Fig. 5. Generalization of the process of saturation of apple fruit particles with sucrose at a temperature of 70 °C with a change in the inert gas supply rate

1 - laminar mode; 2 - transition mode; 3 - turbulent mode

Рис. 5. Узагальнення процесу насичення частинок плоду яблука цукрозою за температури 70 °C за зміни швидкості подачі інертного газу

1 - ламінарний режим; 2 - перехідний режим; 3 - турбулентний режим

З рис. 5 бачимо, що отриману узагальнюючу криву можна розділити на три ділянки, які відповідають трьом гідродинамічним режимам.

Ламінарний режим

Перший режим – ламінарний (ділянка 1), за умов незначної турбулізації потоку. За значень $Re < 12500$ та $Pe < 7 \cdot 10^6$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 9.2 \cdot 10^{-4} \cdot Pe^{0.53} \quad (7)$$

Перехідний режим

Другий режим – перехідний (ділянка 2), за умов збільшення турбулізації потоку. За значень $12500 < Re < 20800$ та $7 \cdot 10^6 < Pe < 13 \cdot 10^6$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 4.94 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{1.3} \quad (8)$$

Турбулентний режим

Третій режим – турбулентний (ділянка 3), за умов максимальної турбулізації потоку. За значень $Re > 20800$ та $Pe > 13 \cdot 10^6$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 1.31 \cdot 10^{-9} \cdot Pe^{1.39} \quad (9)$$

Авторами статті також запропоновано узагальнення процесу насичення провести окремо для зовнішньо- та внутрішньодифузійної області. Для зовнішньодифузійної області узагальнення представимо у вигляді графічної залежності на основі функції:

$$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_n} = f(fo_d) \quad (10)$$

Графіки функції (рівняння 10) наведені на рис. 6.

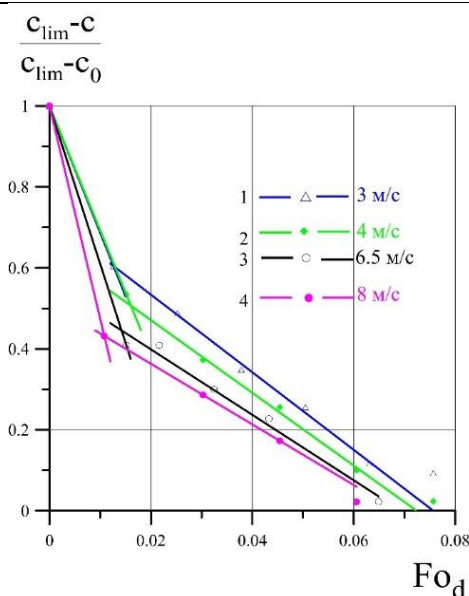


Fig. 6. Generalizing saturation curves of apple fruit particles in the external diffusion region at a temperature of 70 °C

Рис. 6. Узагальнюючі криві насичення частинок плодів яблук у зовнішньодифузійній області за температури 70 °C

З рис. 6. видно, що на початку процесу за короткий проміжок часу концентрація значно змінюється. Таке явище відповідає першій та другій стадіям насичення, коли в початковий момент часу в бланшованих плодах яблука заповнюються цукрозою канали найбільшого діаметру за короткий проміжок часу. Далі насичення стає регулярним, насичуються мікрокапіляри і узагальнюючі криві носять

лінійний характер (третя стадія насичення). Залежності, за допомогою яких можна розрахувати зміну концентрації в часі для третьої стадії насичення, наведені в таблиці 2.

Аналитичні залежності зміни концентрації цукрози в частинках плодів яблука в часі для зовнішньодифузійної області також наведені в таблиці 2.

Table 2

Analytical dependences of changes in sucrose concentration in apple fruit particles over time for the external diffusion region

Таблиця 2

Аналитичні залежності зміни концентрації цукрози в частинках плодів яблука в часі для зовнішньодифузійної області

ω , м/с	Залежність	Абсолютне значення відносної похибки, %
3	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_0} = 0.73 - 9.59 \cdot Fo_d$	1
4	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_0} = 0.65 - 8.99 \cdot Fo_d$	1
6.5	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_0} = 0.56 - 8.09 \cdot Fo_d$	2
8	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_0} = 0.51 - 7.49 \cdot Fo_d$	1

Залежності (табл. 2.), що описують прямі лінії, отримані в результаті апроксимації, добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, абсолютне значення відносної похибки не перевищує 2 %.

Для внутрішньодифузійної області узагальнення представимо у вигляді графічної залежності на основі функції:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_{\text{lim}}} = f(Fo_d). \quad (11)$$

Графіки функції (рівняння 11) наведені на рис. 7.

Як видно з рис. 7., узагальнюючі криві насичення внутрішньодифузійної області можна апроксимувати експоненційною

кривою. Аналітичні залежності зміни яблука в часі для внутрішньодифузійної концентрації цукрози в частинках плодів області наведені в таблиці 3.

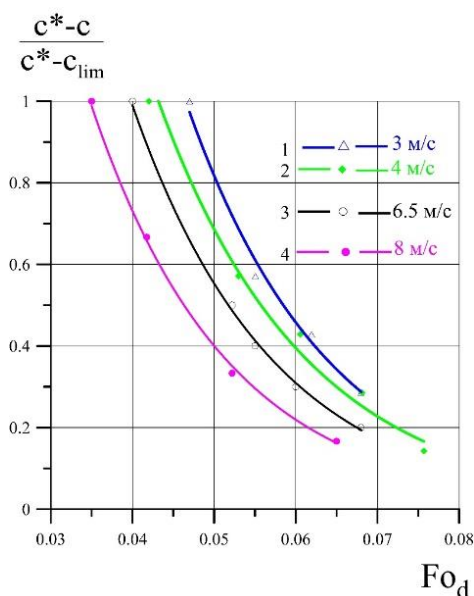


Рис. 7. Узагальнюючі криві насичення частинок плодів яблук внутрішньодифузійної області за температури 70 °C

Fig. 7. Generalizing saturation curves of apple fruit particles in the intradiffusion region at a temperature of 70 °C

Table 3

Analytical dependences of changes in sucrose concentration in apple fruit particles over time for the intradiffusion region

Таблиця 3

Аналітичні залежності зміни концентрації цукрози в частинках плодів яблук в часі для внутрішньодифузійної області

ω , м/с	Залежність	Абсолютне значення відносної похибки, %
3	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 8.12 \cdot e^{-55.2 \cdot Fo_d}$	1
4	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 10.25 \cdot e^{-58 \cdot Fo_d}$	3
6.5	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 15.6 \cdot e^{-58.15 \cdot Fo_d}$	1
8	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 15.8 \cdot e^{-60.22 \cdot Fo_d}$	1

Залежності (табл. 3), що описують експоненційні криві, отримані в результаті апроксимації, добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, абсолютне значення відносної похибки не перевищує 3 %.

З метою математичного узагальнення зміни концентрації цукрози в частині плоду яблука та зміну кількості поглинутої плодом яблука цукрози, скористаємося моделями та теоретичними гіпотезами, наведеними в [22–26].

Розв'язок задачі дифузії в частинці кубічної форми за граничних умов $c(r, \tau_n) = c_n$,

$c(r, \tau_{lim}) = c_{lim}$ з метою визначення кількості поглинутої плодом яблука цукрози ($V_{I_теор}$, $м^3/с$) для періоду постійної швидкості насичення матиме вигляд:

$$V_{I_теор} = \frac{8 \cdot R^3 \cdot (c_{lim} - c_n) \cdot (A - b \cdot Fo_d)}{(\tau_{lim} - \tau_n)}, \quad (12)$$

де A , b – коефіцієнти, отримані шляхом апроксимації дослідних даних, числові значення яких наведені в таблиці 2.

За граничних умов $c(r, \tau_{lim}) = c_{lim}$, $c(r, \tau_k) = c^*$ з метою визначення кількості поглинутої плодом яблука цукрози ($V_{II_теор}$, $м^3/с$) для періоду спадаючої швидкості насичення

розв'язок задачі дифузії матиме вигляд: – для періоду спадаючої швидкості насичення:

$$V_{II_теор} = \frac{8 \cdot R^3 \cdot (c^* - c_{lim}) \cdot A \cdot e^{-b \cdot Fo_d}}{(\tau_k - \tau_{lim})}, \quad (13)$$

де A , b – коефіцієнти, отримані шляхом апроксимації дослідних даних, числові значення яких наведені в таблиці 3.

Експериментально зміну кількості поглинутої плодом яблука цукрози (V_I , V_{II} , M^3/c), визначали:

– для періоду сталої швидкості насичення:

$$V_I = \frac{m_{p-ny.ch.} \cdot (c_{lim} - c_n)}{(\tau_{lim} - \tau_n) \cdot \rho_{ц}} \quad (14)$$

$$V_{II} = \frac{m_{p-ny.ch.} \cdot (c^* - c_{lim})}{(\tau_k - \tau_{lim}) \cdot \rho_{ц}}, \quad (15)$$

де $\rho_{ц}$ – густина цукрози за умов насичення, kg/m^3 ; $m_{p-ny.ch.}$ – маса розчину цукрози в частинці, kg .

В таблиці 4 наведені значення кількості поглинутої частинкою яблука цукрози в період сталої та спадаючої швидкості насичення, отримані експериментальним та теоретичним шляхами.

Table 4

Experimentally determined and theoretically calculated values of the amount of sucrose absorbed by an apple particle during the period of constant and decreasing saturation velocity

Таблиця 4

Експериментально встановлені та теоретично розраховані значення кількості поглинутої частинкою яблука цукрози в період постійної та спадаючої швидкості насичення

ω , м/с	V_I , M^3/c	$V_{I_теор}$, M^3/c	V_{II} , M^3/c	$V_{II_теор}$, M^3/c
3	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$4.0 \cdot 10^{-10}$	$1.39 \cdot 10^{-11}$	$1.43 \cdot 10^{-11}$
4	$3.4 \cdot 10^{-10}$	$4.28 \cdot 10^{-10}$	$1.53 \cdot 10^{-11}$	$1.61 \cdot 10^{-11}$
6,5	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$4.88 \cdot 10^{-10}$	$2.26 \cdot 10^{-11}$	$1.68 \cdot 10^{-11}$
8	$4.9 \cdot 10^{-10}$	$5.84 \cdot 10^{-10}$	$3.85 \cdot 10^{-11}$	$4.9 \cdot 10^{-11}$

Як видно з таблиці 4., похибка між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 20 %.

Отже, залежності (12–13) дають змогу теоретично розрахувати зміну кількості поглинутої цукрози плодом яблука.

Висновки

1. В статті наведена схема розробленої авторами установки та розроблена методика насичення цукрозою частинок плоду яблука.

2. Визначено пористість бланшованих плодів яблука сорту «Семеренко», яка становить $0.162 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

3. Встановлений механізм насичення цукрозою плодів яблука на основі залежності швидкості насичення від часу та від біжучої концентрації. Доведено, що процес дифузії цукрози в частинки плоду яблука можна розділити на чотири стадії, перші три з яких відповідають зовнішньодифузійній області, а четверта – внутрішньодифузійній області.

4. На основі встановленого механізму насичення виведені залежності для розрахунку ефективних коефіцієнтів дифузії навколо частинки (перші дві стадії насичення) в періоді постійної швидкості насичення (третья стадія) та в періоді спадаючої

швидкості насичення (четверта стадія) (табл.1). Доведено, що на ефективні коефіцієнти дифузії має вплив гідродинаміка процесу насичення.

5. Виведені критеріальні рівняння 7–9, які дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі для ламінарного, турбулентного та перехідного режимів барботування сиропу інертним газом. Критеріальні рівняння 7–9 дають можливість розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду яблука шляхом масовіддачі.

6. На основі узагальнення експериментальних досліджень та на основі розрахованих ефективних коефіцієнтів дифузії (табл. 1) виведені залежності зміни концентрації в часі у безрозмірній формі для зовнішньо- (табл. 2) та внутрішньодифузійної (табл. 3) областей.

7. Виведені залежності (табл. 2, 3) дають змогу теоретично розрахувати кількість цукрози, яка переходить в частинку плоду яблука у внутрішньо- та зовнішньодифузійній областях. похибка між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 20 %.

References

- [1] Deiana, M., Montoro, P., Jerković, I., Atzeri, A., Marijanović, Z., Serreli, G., Piacente, S., Ignazio, C., Tuberoso, G. (2019). First characterization of Pompia

intrea candied fruit: The headspace chemical profile, polar extract composition and its biological activities.

- Food Research International*, 120, 620–630. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.016>
- [2] Weijun, Ch., Yanyu, L., Bining, J. (2016). Dissipation behavior of five organophosphorus pesticides in kumquat sample during honeyed kumquat candied fruit processing. *Food Control*, 66, 87–92 <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.033>
- [3] Nunesa, C. Rato, A. E., Barros A. S., Saraiva J. A., Coimbra, M. A. (2009). Search for suitable maturation parameters to define the harvest maturity of plums (*Prunus domestica* L.): A case study of candied plums. *Food Chemistry*, 112(3), 570-574. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.007>
- [4] A. Shukla, R.S. Shukla, C. Das, V. V. Goud. (2019). Gingerols infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango. *Food Chemistry*, 300, 125195. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125195>
- [5] M. Aguirre-García, O. Cortés-Zavaleta, P. Hernández-Carranza, H. Ruiz-Espinosa, C. Enrique Ochoa-Velasco, I. Ruiz-López. (2023). Modeling the impregnation of roselle antioxidants into papaya cubes. *Journal of Food Engineering*, 357, 111585 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111585>
- [6] M. Aguirre-García, P. Hernández-Carranza, O. Cortés-Zavaleta, H. Ruiz-Espinosa, C.E. Ochoa-Velasco, I.I. Ruiz-López. (2020). Mass transfer analysis of bioactive compounds in apple wedges impregnated with beetroot juice: A 3D modelling approach. *Journal of Food Engineering*, 282, 110003. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110003>
- [7] Adsare, S. R., Bellary, A. N., Sowbhagya, H.B., Baskaran, R., Prakash, M., Rastogi, N. K. (2016). Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from Indian gooseberry (*Emblica officinalis*). *Journal of Food Engineering*, 175, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.023>
- [8] Aguirre-García, M., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., Ochoa-Velasco, C.E., Ruiz-López, I.I. (2022). The role of coupled water and solute diffusion and product shrinkage during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 331, 111121. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111121>
- [9] Ramos-Morales, M., Aguirre-García, M., Cortés-Zavaleta, O., Ruiz-Espinosa, H., Estévez-Sánchez, K. H., Enrique, C., Ochoa-Velasco, C.E., Ruiz-López, I. I. (2024). Improving the bioactive content in honeydew melon by impregnation with Hibiscus extract/sucrose solutions: A coupled mass transfer analysis. *Food and Bioprocess Technology*, 144, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.12.001>
- [10] Zecchi, B., Gerla P. (2020). Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 274, 109821
- [11] Prithani, R., Dash, K. K. (2020). Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102407 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102407>
- [12] Abrahão, F. R., Corrêa, J. L. G. (2021). Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63, 2970–2989. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1983764>
- [13] Macedo, L. L., da Silva Araújo, C., Vimercati, W. C., Saraiva, S. H., Teixeira, L. J. Q. (2021). Influence of yacon syrup concentration and drying air temperature on properties of osmotically pre-dehydrated dried banana. *Heat and Mass Transfer*, 57(3), 441–451. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02966-y>
- [14] Huzova, I. O., Atamanyuk, V. M. (2022). Dynamics of drying processes of plant raw material in the period of decreasing speed. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(3), 419–430. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.259694>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] Miletić, N., Popović, B., Mitrović, O., Kandić, M., Leposavić, A. (2014). Phenolic compounds and antioxidant capacity of dried and candied fruits commonly consumed in Serbia. *Czech journal of food sciences*, 32(4), 360–398. <https://doi.org/10.17221/166/2013-CJFS>
- [18] Sharma, A., Bachheti, A., Sharma, P., Bachheti, R. K., Husen, A. (2020). Phytochemistry, pharmacological activities, nanoparticle fabrication, commercial products and waste utilization of *Carica papaya* L.: A comprehensive review. *Current research in biotechnology*, 2, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2020.11.001>
- [19] Ahmed, M. Özcan, I.A., Uslu, M.M. (2024). The Effects of Microwave and Oven Drying on Bioactive Compounds Individual Phenolic Constituents and the Fatty Acid Profiles of Bitter Orange, Mandarin and Grapefruit Peel and Oils. *Waste Biomass Valor*, 15, 4735 – 4746 <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02488-2>
- [20] Ashtiani, S. M., Aghkhani, M. H., Feizy, J., Martynenko, A. (2023). Effect of cold plasma pretreatment coupled with osmotic dehydration on drying kinetics and quality of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 16, 2854–2876. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03096-z>
- [21] Contigiani, E. V., Jaramillo-Sánchez, G., Castro, M. A., Gómez, P. L., Alzamora, S. M. (2018). Postharvest quality of strawberry fruit (*Fragaria x Ananassa* Duch cv. Albion) as affected by ozone washing: Fungal spoilage, mechanical properties, and structure. *Food and Bioprocess Technology*, 11(9), 1639–1650. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2127-0>
- [22] Huzova, I., Atamanyuk, V. (2023). Study on the kinetics, hydrodynamics and mass transfer of the process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution. *Food Science and Technology*, 16(4), 56–63. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i4.2541>
- [23] Huzova, I. (2023). Study on the diffusion process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 552–562. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.280561>
- [24] Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z. (2017). Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production. *Food Science and Technology*, 11(4), 21–28. <https://doi.org/10.15673/fst.v11i4.727>
- [25] Fedoryshyn, O.M., Petrina, R.O., Krvavych, A.S., Hubrii, Z.V., Atamanyuk, V.M. (2023). Research on aspects of the extraction kinetics of metabolites of *carlina acaulis* while mixing. *Voprosy Khimii i*

-
- Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 3-10. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-146-1-3-10>
- [26] Gumnitsky, J., Venger, L., Sabadash, V., Hyvlud, A., Gnativ, Z. (2022). Physical And Mathematical Models Of Target Component Extraction From Rectilinear Capillaries. *Chemistry and Chemical Technology*, 16(1), 112-117. <https://doi.org/10.23939/chcht16.01.112>