



UDC 664.292:547.458.88:66.083.2

STUDY ON THE DIFFUSION PROCESS OF ZUCCHINI FRUITS SATURATION WITH SUCROSE FROM AN AQUEOUS SOLUTION

Iryna O. Huzova

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

Received 29 May 2023; accepted 2 October 2023; available online 25 October 2023

Abstract

An important factor for the introduction of new technologies in food production is the determination of effective diffusion coefficients, forecasting the processes of saturation of vegetables and fruits with dissolved substances, obtaining mathematical models, and describing the processes of mass transfer in plant tissues. Such models need to be developed for easy use and application in a wide area of food production. Raw and blanched sections of marrow fruit were studied under a microscope, the surface of the intercellular space of slices was found and analyzed, the porosity of the mass transfer surface of raw and blanched marrow fruit was determined. A laboratory setup has been developed for studying the processes of saturation of marrow fruit with sucrose from an aqueous solution under conditions of bubbling the solution with air. Kinetic characteristics were experimentally obtained, two regions of sucrose saturation of marrow fruits were found: external diffusion and internal diffusion region. The saturation time of fruits in the external diffusion region is found. On the basis of Fick's first law, the effective diffusion coefficients of the saturation process are determined for the external diffusion and for the internal diffusion region. It has been proved that the effective diffusion coefficients for the external diffusion region increase with an increase in the rate of air supply to bubbling, and the effective diffusion coefficients for the internal diffusion region do not depend on the rate of air supply to the bubbling. On the basis of Fick's second law, equations were derived for the theoretical calculation of the dependence of the change in the concentration of sucrose in squash fruits over time. For the external diffusion region, such equations are linear. For the internal diffusion region, it is exponential. The obtained theoretical dependences can be used for designing, intensifying and optimizing the operation of a plant for saturation of particles of fruits of vegetable raw materials with dissolved substances. Experimental and theoretical findings can be used on an industrial scale.

Key words: effective diffusion coefficient; mass transfer surface; external diffusion; internal diffusion region.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС НАСИЧЕННЯ ПЛОДІВ КАБАЧКА ЦУКРОЗОЮ З ВОДНОГО РОЗЧИНУ

Ірина О. Гузьова

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

Анотація

Важливим фактором для впровадження нових технологій в харчову промисловість є визначення ефективних коефіцієнтів дифузії, а також прогнозування процесів насичення плодів овочів та фруктів розчиненими речовинами, отримання математичних моделей, які описують процеси масоперенесення в тканинах рослин. Такі моделі необхідно розробляти з метою легкого використання та застосування в широкій області обробки харчових продуктів. Під мікроскопом досліджені сирі та бланшовані зрізи плодів кабачка, проаналізована поверхня міжклітинного простору зрізів, визначена пористість поверхні сирого та бланшованого плодів кабачка в процесі масоперенесення. Розроблена лабораторна установка для дослідження процесів насичення плодів кабачка цукрозою з водного розчину в умовах барботажу розчину повітрям. Експериментально отримані кінетичні характеристики, на основі яких виявлені дві області насичення плодів кабачка цукрозою: зовнішньодифузійна та внутрішньодифузійна області. Знайдений час насичення плодів в зовнішньодифузійній області. На основі першого закону Фіка визначені ефективні коефіцієнти дифузії процесу насичення окремо для зовнішньодифузійної та внутрішньодифузійної областей. Доведено, що ефективні коефіцієнти дифузії для зовнішньодифузійної області зростають зі збільшенням швидкості подачі повітря на барботаж, а ефективні коефіцієнти дифузії для внутрішньодифузійної області не залежать від неї. На основі другого закону Фіка виведені рівняння для теоретичного розрахунку залежності зміни концентрації цукрози в плодах кабачка від часу. Для зовнішньодифузійної області такі рівняння носять лінійний характер, а для внутрішньодифузійної – експоненційний. Отримані теоретичні залежності можуть бути використані для проектування, інтенсифікації та оптимізації роботи установки насичення плодів рослинної сировини розчиненими речовинами, яка може бути використана в промислових масштабах.

Ключові слова: ефективний коефіцієнт дифузії; поверхня масоперенесення; зовнішньодифузійна, внутрішньодифузійна область.

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

© 2023 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v31i3.280561

Вступ

Актуальним питанням харчової промисловості є запровадження нових технологій виготовлення корисних продуктів з фруктів та овочів та дослідження методів їх довготривалого збереження. Впровадження технології насичення фруктів та овочів розчиненими речовинами з попередньою їх дегідратацією є ефективним рішенням покращення якості харчових продуктів. Такі процеси являють собою масоперенесення молекул води з плодів рослинних речовин в розчин та масоперенесення розчинних речовин з розчину в плоди [1]. Існує ряд методів дегідратації плодів: ультразвукова та мікрохвильова дегідратація [2], імпульсний вакуум та осмодегідрозаморожування [3], імпульсне електричне поле [4], високий гідростатичний тиск [5; 6]. Крім того, існують методи одночасної дегідратації та насичення плодів розчинними речовинами [7]. Так, автори [8] на прикладі плодів дині та автори [9] на прикладі плодів моркви, броколі та картоплі досліджують вакуум-осмотичну дегідратацію в розчинах цукрози різної концентрації. Також широко застосовують в промисловості найбільш енергоощадні методи, такі як бланшування з одночасним перемішуванням та струшуванням [10]. Наведені методи дегідратації сприяють збереженню структури тканини, зростанню її пористості, утворенню макроскопічних каналів, що в свою чергу призводить до покращення дифузії розчинених речовин в плоди.

Дослідження дифузії розчинених речовин в плоди овочів та фруктів є необхідним для впровадження нових та вдосконалення існуючих технологій виготовлення харчових продуктів. Важливим аспектом в таких дослідженнях є експериментальне визначення коефіцієнтів дифузії та математичне узагальнення масообмінних процесів в цілому. У роботі [11] знайдені ефективні коефіцієнти дифузії цукрози у шкірку та м'якоть плоду вишні. Доведено, що ефективний коефіцієнт дифузії цукрози у шкірку на порядок менший, ніж ефективний коефіцієнт дифузії цукрози у м'якоть. Таке явище автори пояснюють меншою пористістю тканини шкірки, ніж м'якоті. У роботі [12] на основі експериментальних кінетичних досліджень знайдені ефективні коефіцієнти дифузії цукрози у скибки лимону та проведені узагальнення з використанням законів Фіка.

Автори [13; 14] дослідили кінетику масоперенесення цукрози з водного розчину в м'якоть гарбуза, а також узагальнили та змодельували процеси масоперенесення з використанням законів Фіка. Експериментально та теоретично автори [15–17] довели значний вплив температури, концентрації розчинених речовин та форми, розміру і внутрішньої структури плодів на значення коефіцієнтів дифузії, а також провели узагальнення масообмінного процесу для шматків плодів у формі пластини [15] та визначили енергію активації процесу насичення цукрозою плодів манго [16]. В роботі [17] автори дослідили вплив товщини плоду ананасу на визначення профілів концентрації цукрози в залежності від положення для різних значень часу занурення. Також проводились дослідження по визначенню коефіцієнта ефективної дифузії для свіжої шкірки оливки та шкірки оливки, обробленої розчином NaOH [18]. У другому випадку коефіцієнт ефективної дифузії виявився на два порядки вищий.

Визначення коефіцієнтів ефективної дифузії та створення математичних моделей для прогнозування процесу масоперенесення є необхідним також для сушіння продукту, попередньо насиченого розчиненими речовинами [19]. Автори [20] доводять: яблука, насичені глюкозою, досягають кінцевої вологості швидше, ніж свіжі яблука, що пояснюється попередньою дегідратацією в розчині глюкози. У роботі [21] експериментально знайдені коефіцієнти ефективної дифузії води зі стебел соняшника, в роботі [22] розроблена математична інтерпретація динаміки зміни температур під час сушіння гарячого монодисперсного шару рослинної сировини, а в роботі [23] досліджується динаміка процесів сушіння рослинної сировини в періоді спадаючої швидкості. Також актуальним є розроблення енергоощадних методів сушіння рослинної сировини [24].

Огляд джерел літератури підкреслює важливість вдосконалення методів визначення ефективних коефіцієнтів дифузії, а також прогнозування процесів насичення плодів овочів та фруктів розчиненими речовинами. Важливим для впровадження нових технологій є також отримання математичних моделей, які описують процеси масоперенесення в тканинах рослин [25]. Такі моделі необхідно розробляти з метою легкого використання та застосування в широкій

області технологій насичення харчових продуктів. Модель повинна враховувати здатність кожного окремого компонента дифундувати в середину тканин, а також: масове співвідношення продукту та розчину, їх фізико-хімічні властивості, розмір та форму продукту. Застосування таких моделей має спрогнозувати дифузійний процес, який би мав спостерігатися в гістологічних зрізах під мікроскопом.

Метою даної роботи є дослідження під мікроскопом сирих та бланшованих зрізів плодів кабачка, знаходження та аналіз поверхні міжклітинного простору таких зрізів; дослідження дифузійних процесів під час насичення плодів кабачка цукрозою з водного розчину в умовах барботажу розчину повітрям.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити середній діаметр, загальну довжину, площу поверхні каналів між клітинами сирого та бланшованого плодів кабачка, а також загальну площу поверхні клітини. На основі визначених величин знайти пористість поверхні масоперенесення сирого та бланшованого плодів кабачка;
- розробити лабораторну установку для дослідження процесів насичення плодів кабачка цукрозою з водного розчину в умовах барботажу розчину повітрям;
- встановити залежність зміни концентрації цукрози в плодах кабачка за різних швидкостей подачі повітря на барботаж;
- на основі отриманих експериментальних даних встановити закономірності перебігу

дифузійних процесів цукрози з розчину в середину плодів кабачка;

– визначити ефективні коефіцієнти дифузії процесу насичення;

– узагальнити процеси насичення, вивести рівняння для теоретичного розрахунку залежності зміни концентрації цукрози в плодах кабачка від часу.

Експериментальна частина

Об'єктом дослідження виступив кабачок сорту «Алберелло». Для експериментального визначення коефіцієнта ефективної дифузії плоди кабачка піддавали аналізу на електронному мікроскопі [26]. На мікроскопі розглядали зразки сирого та бланшованого 5 хв в киплячій воді плодів кабачка з попередньо знятою шкіркою.

Зразки препарували, отримані препарати проглядали з використанням світлового мікроскопа Leica DM-2500 (Switzerland). Фотофіксацію зображення здійснювали з використанням цифрової камери Leica DFC450C та програмного забезпечення Leica Application Suite Version 4.4[Build:454] Leica Microsystems (Switzerland) Limited.

Фотографії зразків аналізували за допомогою програми Aperio Image Scope [v12.4.3.5008]. Ця програма дозволяє визначити середній діаметр клітин та простору між ними, а також загальну довжину каналів між клітинами на певній площі фрагменту клітини.

Для визначення зміни концентрації цукру в плодах кабачка в часі під час насичення їх цукром з водного розчину, експеримент проводили на установці, зображеній на рис. 1.

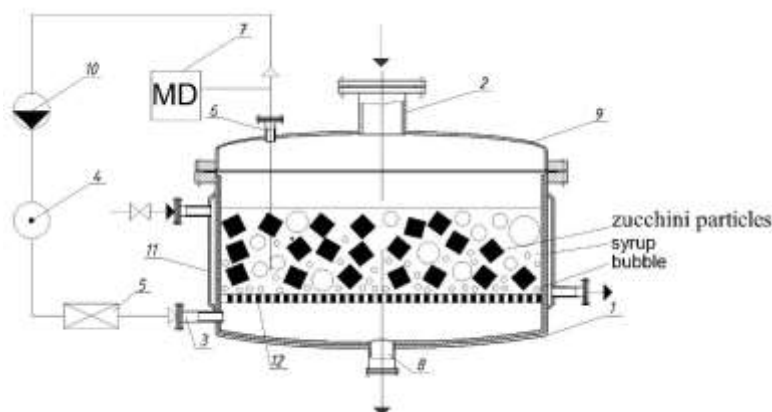


Fig. 1. Scheme of setting the saturation of zucchini particles with sugar

1 – body; 2 – fitting for supplying sugar syrup and zucchini particles; 3 – compressed air supply nozzle; 4 – fan; 5 – heater; 6 – nozzle for air outlet; 7 – device for measuring temperature; 8 – connection for draining syrup; 9 – cover; 10 – drip deflector; 11 – shell; 12 – grid

Рис. 1. Схема установки насичення частинок кабачка цукром

1 – корпус; 2 – штуцер для подачі цукрового сиropу та частинок кабачка; 3 – патрубок подачі стиснутого повітря; 4 – вентилятор; 5 – калорифер; 6 – патрубок для виходу повітря; 7 – прилад для вимірювання температури; 8 – штуцер для зливу сиropу; 9 – кришка; 10 – краплевідбійник; 11 – оболонка; 12 – решітка

Складовою частиною установки є циліндричний емальований зсередини корпус 1, до якого зверху фланцевим з'єднанням кріпиться кришка 9. Нижня частина корпусу 1 оснащена емальованою решіткою 12. У корпус 1 через штуцер 2 подається цукровий сироп та шматки плодів рослинної сировини для насичення, які розподіляються на решітці 12. Температура сиропу всередині корпусу 1 вимірюється приладом 7. Нагрівається сироп за допомогою гарячої води (водяної пари), яка подається в оболонку 11. Установка також оснащена патрубком 3 для подачі стиснутого повітря, яке подається вентилятором 4 та нагрівається калорифером 5 до температури сиропу. Виходить повітря з установки через патрубок 6, проходить через краплевідбійник 10 та повертається назад в установку. Після процесу насичення рослинної сировини цукром, сироп зливається через штуцер 8.

Експеримент на установці (рис. 1) проводиться наступним чином. Плоди кабачка відділяються від шкірки та формуються у зразки форми прямокутного паралелепіпеда однакових розмірів (18×10×8 мм) та однаковою масою. Обраний розмір плодів обумовлений споживними властивостями готових цукатів, зокрема їх прийнятним смаком, добрим засвоєнням, стійкістю під час зберігання, універсальністю використання як для безпосереднього споживання, так і для виготовлення більшості кондитерських виробів. Далі всі зразки бланшують 5 хв. Бланшовані плоди кабачка насичують цукром в цукровому сиропі з концентрацією 65 % (мас.) подачею повітря на барботаж. Досліди проводили за температури 70 °С. Температура вибирається таким чином, щоб не доводити сироп до кипіння.

У циліндричний емальований корпус 1 через штуцер 2 заливається цукровий сироп. Підігрів сиропу відбувається водяною парою через оболонку 11. Коли, за допомогою термopар, прилад 7 фіксує задану температуру, в емальований корпус 1 через штуцер 2 завантажуються зразки плодів бланшованого кабачка. Одночасно через патрубок 3 в циліндр подається стиснуте повітря з температурою, рівною температурі сиропу. Таким чином в циліндрі відбувається пневматичне інтенсивне перемішування шматків кабачка з цукровим сиропом.

Зразки плодів кабачка по одному виймають з сиропу кожні 2 хв. Після цього зразки розрізають на дві однакові половинки, з них вичавлюють сік та визначають концентрацію соку з цукрованого кабачка за шкалою Brix за допомогою рефрактометра НТ118 (0–80 % Brix). Дослід триває до того моменту, коли концентрація соку з кабачка останніх 3-х проб стає незмінною.

Досліди в динамічному режимі проводяться за наступних витрат повітря: 2 л/хв, 5 л/хв, 8 л/хв, 9.5 л/хв. Швидкості у патрубку 3 становлять: 1.5 м/с, 4 м/с, 6.6 м/с, 8 м/с відповідно. Діапазон витрат повітря вибирається таким чином, щоб забезпечити інтенсивне перемішування плодів кабачка та запобігти інтенсивному винесенню краплин сиропу з апарату.

По завершенню експериментів вимикається подача повітря, а сироп зливають через штуцер 8. Температура фіксується восьмиканальним термоелектричним перетворювачем ПТ-108.

Результати та їх обговорення

Фотографії зразків (збільшення в 1000 р, окуляр 10) сирого та бланшованого плодів кабачка наведені на рис. 2, 3.

Для визначення коефіцієнта ефективної дифузії всередині плодів кабачка необхідно визначити пористість поверхні масоперенесення досліджуваного зразка. Пористість поверхні масоперенесення ($m, m^2/m^2$) визначається як відношення загальної площі поверхні каналів між клітинами ($S_{пустот}, m^2$) до загальної площі клітини ($S_{заг}, m^2$). Для визначення пористості проаналізуємо фотографії клітин.

З рис. 2а визначаємо діаметр каналів між клітинами ($d_i, \text{мкм}, 14$ вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами сирого кабачка ($D_{сер}, \text{мкм}$). З рис. 2б визначаємо діаметр каналів між клітинами ($d_i, \text{мкм}, 14$ вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами бланшованого кабачка ($D_{сер}, \text{мкм}$). Отримаємо результати:

$$\text{Для сирого кабачка: } D_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=14} d_i = 0,4836$$

Для бланшованого кабачка:

$$D_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=14} d_i = 0,7436$$

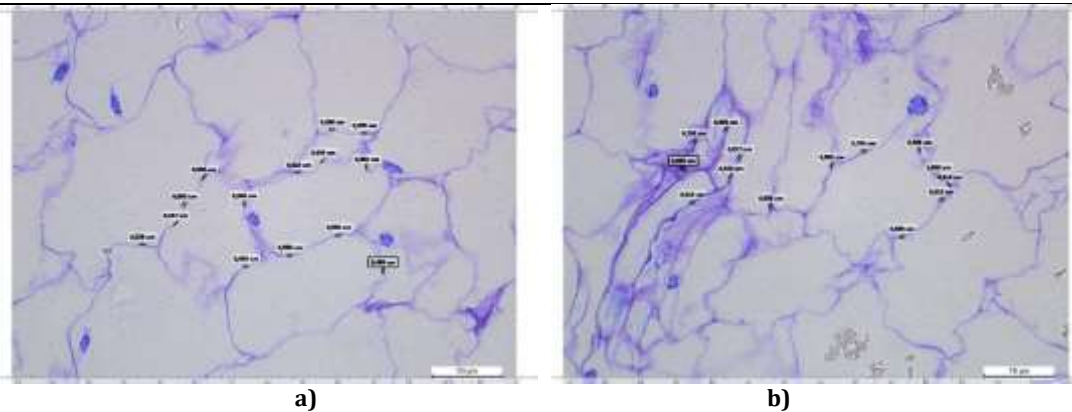


Fig. 2. Photographs of a zucchini fruit cell with determination of the average diameter of channels between cells
a) raw; b) blanched

Рис. 2. Фотографії клітини плоду кабачка із визначенням середнього діаметра каналів між клітинами
а) сирого; б) бланшованого

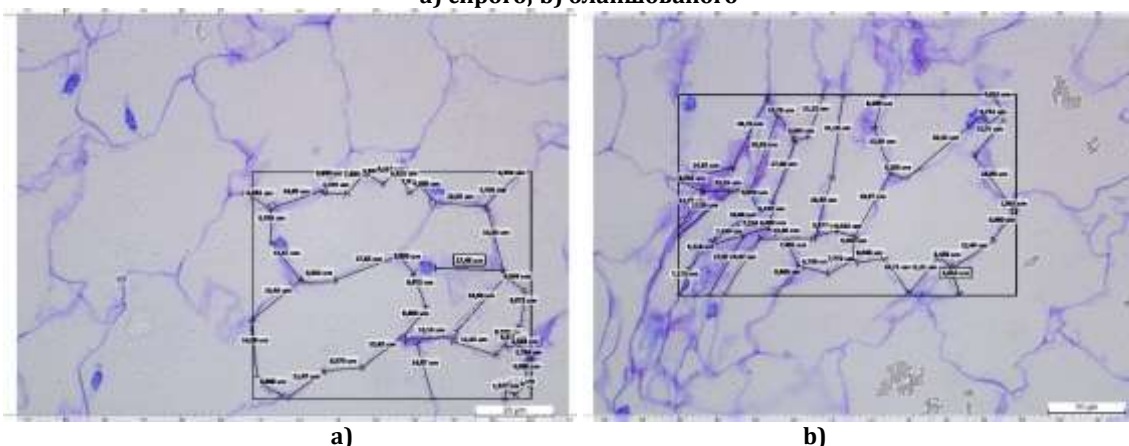


Fig. 3 Photographs of a cell of a zucchini fruit with determination of the length of channels between cells
a) raw; b) blanched

Рис. 3 Фотографії клітини плоду кабачка із визначенням довжини каналів між клітинами
а) сирого; б) бланшованого

З рис. 3а визначаємо довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 43 вимірів) та загальну довжину каналів між клітинами сирого кабачка (L , мкм). З рис. 3б визначаємо довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 49 вимірів) та загальну довжину каналів між клітинами бланшованого кабачка (L , мкм). Отримаємо результати:

$$\text{Для сирого кабачка: } L = \sum_{i=1}^{n=43} l_i = 627,04$$

Для бланшованого кабачка:

$$L = \sum_{i=1}^{n=49} l_i = 801,43$$

Беручи до уваги, що кожен канал між клітинами в перерізі має прямокутну форму, площа поверхні каналів між клітинами ($S_{\text{пустот}}$, мкм²) розраховується наступним чином:

$$\text{Для сирого кабачка: } S_{\text{пустот}} = D_{\text{сер}} \cdot L = 303,22$$

Для бланшованого кабачка:

$$S_{\text{пустот}} = D_{\text{сер}} \cdot L = 595,92$$

Загальна площа клітини ($S_{\text{заг}}$, мкм²) розраховується як площа виділеного прямокутника на фотографіях сирого (рис. 3а) та бланшованого (рис. 3б) кабачка.

Для сирого кабачка: $S_{\text{заг}} = 3848,92$.

Для бланшованого кабачка: $S_{\text{заг}} = 3848,92$.

Отже, пористість поверхні масоперенесення (m , мкм²/мкм²)

Для сирого кабачка: $m = S_{\text{пустот}}/S_{\text{заг}} = 0,072$

Для бланшованого кабачка:

$$m = S_{\text{пустот}}/S_{\text{заг}} = 0,126$$

З результатів розрахунків видно, що пористість поверхні масоперенесення бланшованого кабачка більша приблизно в 2 рази пористості поверхні масоперенесення сирого кабачка. Саме тому для виробництва цукатів рекомендують використовувати бланшовані плоди.

Дифузія цукрози з водного розчину в плід рослинної сировини відбувається наступним чином: на початку процесу цукровий розчин заповнює макро- та мікрокапіляри шматка плоду з одночасною дегідратацією; наступним етапом є дифузія в міжклітинному просторі та

останній, лімітуючий етап – переміщення цукрози в самій клітині. Такі етапи дифузії можна виділити в сирих плодах рослинної сировини.

У бланшованих плодах структура клітин руйнується, усі капіляри розширюються (рис. 2б, 3б) та набувають інших форм. Тому дифузія в таких плодах має наступні два етапи: цукровий розчин заповнює макро- та мікрокапіляри шматка плоду, а потім триває

лімітуюча стадія – переміщення та перерозподіл цукрози в зруйнованих клітинах. Перший етап носить назву зовнішньодифузійна область, а другий, лімітуючий етап – внутрішньодифузійна область.

Доведемо це на прикладі аналізу кінетичних кривих зміни концентрації цукрози в плодах кабачка.

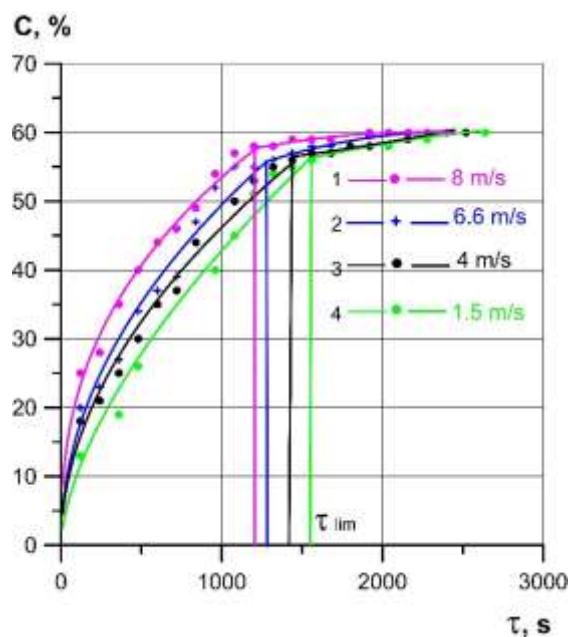


Fig. 4. Kinetic curves of changes in the concentration of sucrose (% by weight) in zucchini fruits at different rates of air supply to the bubbler at a temperature of 70 °C

- 1 – kinetic curve of saturation at an air speed of 8 m/s;
- 2 – kinetic saturation curve at an air speed of 6.6 m/s;
- 3 – kinetic saturation curve at an air speed of 4 m/s;
- 4 – kinetic saturation curve at an air speed of 1.5 m/s.

Рис. 4. Кінетичні криві зміни концентрації цукрози (% мас.) в плодах кабачка за різних швидкостей подачі повітря на барботаж за температури 70 °C

- 1 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 8 м/с;
- 2 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 6.6 м/с;
- 3 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 4 м/с;
- 4 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 1.5 м/с.

Як видно з графіків (рис. 4), кожна кінетична крива (1–4) має ділянку зовнішньодифузійної та внутрішньодифузійної області. З рис. 4 видно, що інтенсивність перенесення молекул цукрози в плоди кабачка буде залежати від швидкості подачі повітря. Зріст швидкості подачі повітря на барботаж сприяє інтенсифікації процесу насичення. Причому з рис. 4 чітко видно більший вплив швидкості повітря на початку процесу насичення.

Проаналізуємо дифузійні процеси та визначимо коефіцієнт дифузії. Для висококонцентрованих розчинів коефіцієнт

ефективної дифузії може бути визначений виключно експериментальним шляхом.

Авторами статті (якої? Якщо цієї, то краще просто – нами) запропоновані окремі методи узагальнення зовнішньодифузійної та внутрішньодифузійної області. З результатів експериментальних досліджень, зображених на рис. 4, було знайдено граничний час насичення цукатів у зовнішньодифузійній області (τ_{lim}) та кінцева (межова) концентрація цукрози (C_{lim}), що відповідає часу насичення цукатів у зовнішньодифузійній області. Отримані значення наведені в таблиці 1.

The results of experimental studies in the external diffusion region: the limiting time of saturation (τ_{lim}) and the limiting concentration of sucrose (c_{lim})

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень в зовнішньодифузійній області: граничний час насичення (τ_{lim}) та межева концентрація цукрози (c_{lim})

ω , м/с	τ_{lim} , с	c_{lim} , %(об)
1.5	1560	42.7
4	1440	43.47
6.6	1320	44.25
8	1200	47.13

Отримані графічним методом значення (рис. 4) τ_{lim} та відповідне значення c_{lim} дають можливість виділити зовнішньо- і внутрішньодифузійну області та провести їх узагальнення.

Розрахуємо коефіцієнти ефективної дифузії, виходячи з першого закону Фіка, для зовнішньодифузійної області:

$$D_{m-I} = \frac{m \cdot M_I}{F} \cdot \frac{c_{lim} - c_0}{R}, \quad (1)$$

для внутрішньодифузійної області:

$$D_{m-II} = \frac{m \cdot M_{II}}{F} \cdot \frac{c^* - c_{lim}}{R}, \quad (2)$$

де D_{m-I} – коефіцієнт ефективної дифузії у зовнішньодифузійній області, м²/с;

D_{m-II} – коефіцієнт ефективної дифузії у внутрішньодифузійній області, м²/с;

M_I – кількість сиропу, що продифундувала, в періоді зовнішньодифузійної області, м³/с;

M_{II} – кількість сиропу, що продифундувала, в періоді внутрішньодифузійної області, м³/с;

F – загальна зовнішня поверхня шматка плоду кабачка, м²;

m – пористість поверхні масоперенесення (м²/м²), попередньо визначена за рис. 2б, 3б;

R – еквівалентний радіус частинки кабачка, м;

c – біжуча концентрація цукрози в шматку кабачка, %(об);

c^* – рівноважна концентрація цукрози в шматку кабачка, %(об);

c_{lim} – гранична концентрація цукрози в шматку кабачка, %(об);

c_0 – початкова концентрація цукрози в шматку кабачка, %(об).

Результати розрахунків коефіцієнтів дифузії наведені в табл. 2.

Таблиця 2

The results of calculations of diffusion coefficients for the externally and internally diffused region

Таблиця 2

Результати розрахунків коефіцієнтів дифузії для зовнішньо- та внутрішньодифузійної області.

ω , м/с	D_{m-I} , м ² /с	D_{m-II} , м ² /с
1.5	$5.36 \cdot 10^{-10}$	$6.54 \cdot 10^{-10}$
4	$5.78 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$
6.6	$6.26 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$
8	$6.75 \cdot 10^{-10}$	$4.1 \cdot 10^{-10}$
	$D_{m-I(ср)} = 6.04 \cdot 10^{-10}$	$D_{m-II(ср)} = 5.91 \cdot 10^{-10}$

Як видно з табл. 2, коефіцієнт D_{m-I} зі зростанням швидкості подачі повітря буде зростати незначно, в той час як коефіцієнт D_{m-II} не залежить від швидкості подачі повітря. Це пояснюється тим, що вплив зовнішньої гідродинаміки інтенсифікує зовнішньодифузійні процеси масообміну, що в свою чергу призводить до зростання кількості потоку в середину шматку.

Проведемо узагальнення досліджуваних процесів з метою теоретичного розрахунку залежності зміни концентрації цукрози в плодах кабачка від часу.

Кінетику дифузійних процесів описує другий закон Фіка [27–29]:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Приєднаємо до диференційного рівняння (3) крайові умови:

$$\tau = 0; c = c_0 = 0$$

$$c^* = \text{const.}$$

Тоді результатом розв'язку рівняння (3) в загальному вигляді буде залежність:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = f \left(\frac{D_m \cdot \tau}{R^2} \right) = f(Fo_d) \quad (4)$$

Авторами статті (Нами?) запропоновано узагальнення досліджуваних процесів провести окремо для зовнішньо- та внутрішньодифузійної областей. Тоді залежність (4), представлена в загальному вигляді, буде мати вигляд

для зовнішньодифузійної області:

$$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_0} = f(Fo_d); \quad (5)$$

для внутрішньодифузійної області:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_{\text{lim}}} = f(Fo_d). \quad (6)$$

На основі отриманої функціональної залежності (5) проведемо узагальнення зовнішньодифузійної області процесу насичення цукрозою плодів кабачка. Узагальнюючі криві зображені на рис. 5.

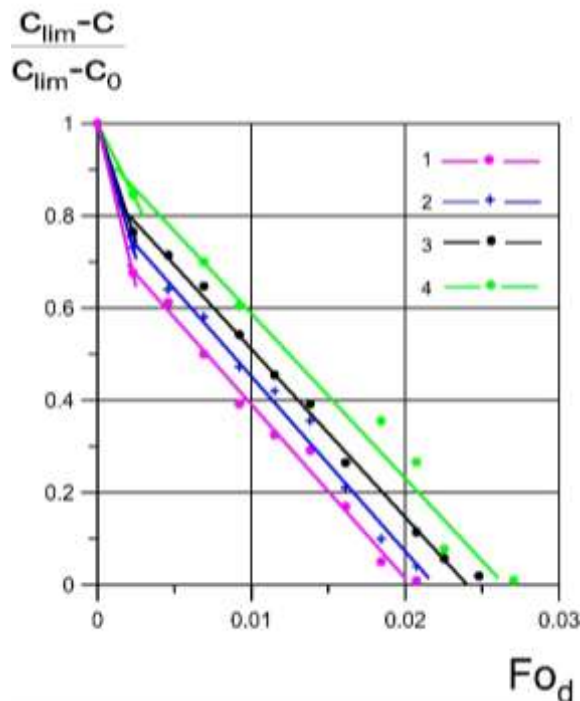


Fig. 5. Generalization of the external diffusion region of the process of saturation of the particles of the squash fruit with sucrose at a temperature of 70 °C with a change in the air supply speed

- 1 - kinetic curve of saturation at an air speed of 8 m/s;
- 2 - kinetic saturation curve at an air speed of 6.6 m/s;
- 3 - kinetic saturation curve at an air speed of 4 m/s;
- 4 - kinetic saturation curve at an air speed of 1.5 m/s.

Рис. 5. Узагальнення зовнішньодифузійної області процесу насичення частинок плоду кабачка цукрозою за температури 70 °C за зміни швидкості подачі повітря.

- 1 - кінетична крива насичення за швидкості повітря 8 м/с;
- 2 - кінетична крива насичення за швидкості повітря 6.6 м/с;
- 3 - кінетична крива насичення за швидкості повітря 4 м/с;
- 4 - кінетична крива насичення за швидкості повітря 1.5 м/с.

З рис. 5. видно, що на початку процесу існує нерегулярний режим. Існування такого режиму пояснюється тим, що в початковий момент часу в бланшованих плодах кабачка заповнюються цукрозою канали найбільшого діаметру за короткий проміжок часу. Далі насичення стає регулярним, насичуються макро- та мікрокапіляри, і узагальнюючі криві носять лінійний характер. Залежності, за допомогою яких можна розрахувати зміну концентрації в часі та знайти коефіцієнт ефективної дифузії для зовнішньодифузійної області, наведені в таблиці 3.

З рис. 5. та таблиці 3 видно, що кінетичні криві для зовнішньодифузійної області апроксимуються прямими лініями, тангенс кута нахилу яких зростають з ростом

швидкості подачі повітря на барботаж. Це підтверджує залежність коефіцієнта ефективної дифузії від швидкості подачі повітря.

З рис. 5. та таблиці 3 видно, що кінетичні криві для зовнішньодифузійної області апроксимуються прямими лініями, тангенс кута нахилу яких зростають з ростом швидкості подачі повітря на барботаж. Це підтверджує залежність коефіцієнта ефективної дифузії від швидкості подачі повітря.

Залежності (табл. 3), що описують прямі лінії, отримані в результаті апроксимації, добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, похибка не перевищує 2 %.

Dependencies of changes in concentration over time for the external diffusion region

Таблиця 3

Залежності зміни концентрації в часі для зовнішньодифузійної області		
$\omega, \text{ м/с}$	Залежність	Похибка, %
1.5	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_o} = 0.95 - 35.75 \cdot Fo_d$	2
4	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_o} = 0.87 - 36.43 \cdot Fo_d$	1
6.6	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_o} = 0.83 - 37.93 \cdot Fo_d$	1
8	$\frac{c_{\text{lim}} - c}{c_{\text{lim}} - c_o} = 0.77 - 37.67 \cdot Fo_d$	2

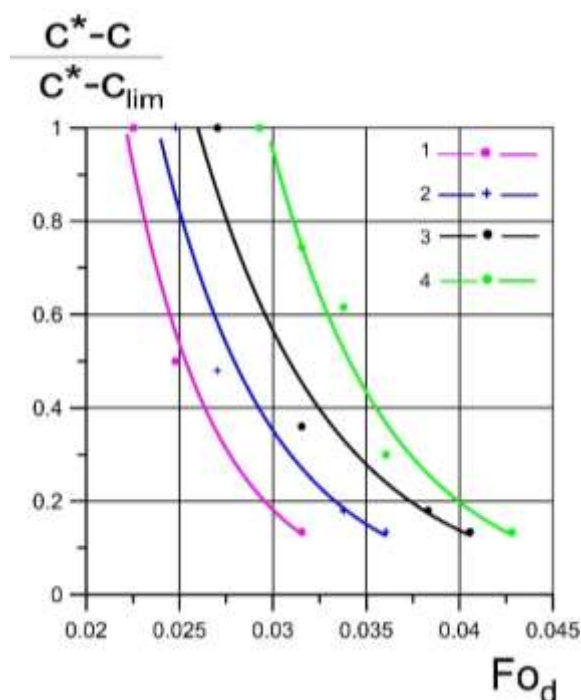


Fig. 6. Generalization of the intradiffusion region of the process of saturation of the particles of the squash fruit with sucrose at a temperature of 70 °C with a change in the air supply speed

1 – kinetic curve of saturation at an air speed of 8 m/s;

2 – kinetic saturation curve at an air speed of 6.6 m/s;

3 – kinetic saturation curve at an air speed of 4 m/s;

4 – kinetic saturation curve at an air speed of 1.5 m/s

Рис. 6. Узагальнення внутрішньодифузійної області процесу насичення частинок плоду кабачка цукрозою за температури 70 °C за зміни швидкості подачі повітря

1 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 8 м/с;

2 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 6.6 м/с;

3 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 4 м/с;

4 – кінетична крива насичення за швидкості повітря 1.5 м/с

Як видно з рис. 6, результати експериментальних досліджень для внутрішньодифузійної області можна узагальнити експоненційною залежністю. Залежності, за допомогою яких можна розрахувати зміну концентрації в часі та знайти коефіцієнт ефективної дифузії для внутрішньодифузійної області, наведені в таблиці 4.

Як видно з табл. 4, предекспоненційні множники та показники ступеня перед числом Фур'є в отриманих залежностях не мають закономірностей зростання з ростом швидкості подачі повітря на барботаж. Це доводить той факт, що коефіцієнт ефективної дифузії у внутрішньодифузійній області не залежить від швидкості подачі повітря на барботаж, а залежить виключно від внутрішньої структури плодів.

Dependencies of concentration changes over time for the intradiffusion region

Таблиця 4

Залежності зміни концентрації в часі для внутрішньодифузійної області

ω , м/с	Залежність	Похибка, %
1.5	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 105.73 \cdot e^{-156.98 \cdot Fo_d}$	2
4	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 39.39 \cdot e^{-141.42 \cdot Fo_d}$	3
6.6	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 56.95 \cdot e^{-169.51 \cdot Fo_d}$	3
8	$\frac{c^* - c}{c^* - c_{lim}} = 120.18 \cdot e^{-216.44 \cdot Fo_d}$	1

Експоненційні залежності (табл. 4), отримані в результаті апроксимації, добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, похибка не перевищує 3 %.

Висновки

1. З аналізу мікроскопічних досліджень гістологічних зрізів визначено пористість поверхні масоперенесення сирого та бланшованого плодів кабачка. Доведено, що пористість поверхні масоперенесення бланшованого кабачка у порівнянні з сирим більша приблизно в 2 рази.

2. Встановлено залежність зміни концентрації цукрози у часі в плодах кабачка за різних швидкостей подачі повітря на барботаж.

3. На основі отриманих експериментальних даних доведено існування зовнішньодифузійної та внутрішньодифузійної областей під час перебігу дифузії цукрози з розчину всередину плодів кабачка. Визначено час насичення плодів в зовнішньодифузійній області.

4. На основі першого закону Фіка визначено середні ефективні коефіцієнти дифузії процесу насичення, які дорівнюють $D_{m,I (сеп)} = 6.04 \cdot 10^{-10}$ для зовнішньодифузійної області та $D_{m,II (сеп)} = 5.91 \cdot 10^{-10}$ (одиниці розмірності?) для внутрішньодифузійної області. Доведено, що ефективні коефіцієнти дифузії для зовнішньодифузійної області зростатимуть з ростом швидкості подачі повітря на барботаж.

5. На основі визначених ефективних коефіцієнтів дифузії проведені узагальнення процесів насичення в зовнішньодифузійній та внутрішньодифузійній областях.

6. Виведені рівняння для теоретичного розрахунку залежності зміни концентрації цукрози в плодах кабачка в часі. Для зовнішньодифузійної області такі рівняння носять лінійний характер, для внутрішньодифузійної – експоненційний. Виведені теоретичні залежності добре узгоджуються з експериментальними дослідженнями, похибка не перевищує 3 %.

References

- [1] Pandiselvam R, Tak Y., Olum E., Sujayasree O. J., Tekgül Y., Çalışkan Koç G., Kaur M., Nayi P., Kothakota A., Kumar M. (2022). Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of texture studies*, 53(6), 737–762. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12643>
- [2] Nowacka M., Dadan M., Tylewicz U. (2021). Current Applications of Ultrasound in Fruit and Vegetables Osmotic Dehydration Processes. *Applied Sciences*, 11(3), 1269. <https://doi.org/10.3390/app11031269>
- [3] Schudel S., Prawiranto K., Defraeye T. (2021). Comparison of freezing and convective dehydrofreezing of vegetables for reducing cell damage. *Journal of Food Engineering*, 293, 110376 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110376>
- [4] Simpson R., Ramírez C., Birchmeier V., Almonacid A., Moreno J., Nuñez H., Jaques A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204–211 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>
- [5] González-Pérez J. E., Ramírez-Corona N., López-Malo Aurelio. (2021). Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: Process Factors and Non-Thermal Methods. *Food Engineering*, 13, 344–374. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09276-3>
- [6] Janowicz M., Ciurzyńska A., Lenart A. (2021). Effect of Osmotic Pretreatment Combined with Vacuum Impregnation or High Pressure on the Water Diffusion Coefficients of Convection Drying: Case Study on Apples. *Foods*, 10(11), 2605. <https://doi.org/10.3390/foods10112605>
- [7] Torreggiani D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*,

- 26(1), 59–68. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(93\)90106-S](https://doi.org/10.1016/0963-9969(93)90106-S)
- [8] Ferrari C. C., Arballo J. R., Mascheroni R. H., Hubinger M. D. (2011). Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. *Food Science and Technology*, 46(2), 436–443 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02510.x>
- [9] Ohnishi S., Miyawaki O. (2005). Osmotic Dehydrofreezing for Protection of Rheological Properties of Agricultural Products from Freezing-Injury. *Food Science and Technology Research*, 11(1), 52–58. <https://doi.org/10.3136/fstr.11.52>
- [10] Ramya V., Jain N. K.. (2017). A Review on Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: An Integrated Approach. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12440. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12440>
- [11] Maldonado M., González Pacheco J. (2022). Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries. *Helion*, 8(1), e08788. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08788>
- [12] Rubio-Arreaez S., Capella J. V., Ortolá M. D., Castelló M. L. (2015). Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. *Food Science & Technology*, 50(9), 2046-2051. <https://doi.org/10.1111/jifs.12859>
- [13] Abraão A. S., Lemos A. M., Vilela A., Sousa J. M., Nunes F. M. (2013). Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.04.006>
- [14] 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>
- [15] Rezagah M. E., Kashaninejad M., Mirzaei H., Khomeiri M. (2010). Osmotic dehydration of button mushroom: Fickian diffusion in slab configuration. *Latin American applied research*, 40(1), 23–26. <http://www.scielo.org.ar/pdf/laar/v40n1/v40n1a04.pdf>
- [16] Alakali J.S., Ariahu C.C., Nkpa N.N. (2006). Kinetics of osmotic dehydration of mango. *Journal of food processing and preservation*, 30(5), 597-607. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2006.00080.x>
- [17] Laura A., Rodolfo R., Mascheroni H. (2005). Rate of water loss and sugar uptake during the osmotic dehydration of pineapple. *Food Science and Technology*, 48 (5), 761–770 <https://doi.org/10.1590/S1516-89132005000600012>
- [18] Zuritz C. A., Maldonado M. B. (2005). A simple method to determine diffusion of sodium in the epidermis of green olives. *Journal of Process Engineering*, 27(5), 328–344 <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2004.00466.x>
- [19] Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M, Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á. A., Figiel A. (2020). Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. *Foods*, 9(9), 1261 <https://doi.org/10.3390/foods9091261>
- [20] Mandala G., Anagnostaras E.F., Oikonomou C.K. (2005). Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 307-316 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.021>
- [21] Kindzera, D., Hosovskyi, R., Atamanyuk, V., Symak, D. (2021). Heat transfer process during filtration drying of grinded sunflower biomass. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(1), 118–124. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.118>
- [22] 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>
- [23] 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>
- [24] 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>
- [25] Spiazzi E., Mascheroni R. (1997). Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 34(4), 387–410 [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00102-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00102-7)
- [26] Seguí L., Fito P.J., Fito P. (2012). Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 240-247 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.012>
- [27] Santos Barros A., Ferreira I. L., Seabra Moreira A. L. (2016). Mathematical method to characterize the inward solid state diffusion in cylindrical parts. *Metallurgy and materials*, 69(3), 341-348. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014690044>
- [28] Kappelt C, Rzehak R. (2022). Investigation of Fluid-dynamics and Mass-transfer in a bubbly mixing layer by Euler-Euler simulation. *Chemical Engineering Science*, 264(31), 118147. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118147>
- [29] Shi P, Rzehak R. (2020). Solid-liquid flow in stirred tanks: Euler-Euler/RANS modeling. *Chemical Engineering Science*, 227(14), 115875. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115875>