

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК ПЛОДУ ЛИМОНУ

Гузьова І.О., к.т.н., доц., Атаманюк В.М., д.т.н., проф.
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Анотація. Дана стаття присвячена вирішенню проблеми насичення частинок плодів лимону цукрозою за мінімальний проміжок часу за умов максимального енергозбереження. Авторами статті розроблені режими насичення частинок плоду лимону. Насичення частинок проводилося в двох режимах. Перший – режим настоювання, сироп в стані спокою. Дослідження проводили за температур 50 °С, 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С. Другий – режим барботування, об'єм сиропу барботується повітрям через дренажну тарілку. Частинки плоду лимону при цьому знаходяться на решітці, зануреній в сироп над дренажною тарілкою. Дослідження в режимі барботування проводили за температури 70 °С та витратах повітря ($\text{м}^3/\text{с}$): $6,25 \cdot 10^{-5}$; $8,06 \cdot 10^{-5}$; $12,5 \cdot 10^{-5}$; $15,6 \cdot 10^{-5}$, що відповідає швидкості через отвори дренажної тарілки: 3 м/с; 4 м/с; 6,5 м/с; 8 м/с відповідно.

Авторами статті доведено, що найменші енерговитрати ($\Sigma Q = 8,353 \text{ кДж/кг}_{\text{сиропу}}$) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу за температури 70 °С повітрям швидкістю 6,5 м/с, що підтверджує економічну доцільність даного методу.

В роботі наведені та проаналізовані залежності зміни швидкості насичення від концентрації та в часі. Аналіз залежностей доводить, що на початку процесу швидкість насичення зменшується. На цьому етапі відбувається процес масовіддачі молекул цукрози з барботуючого розчину до поверхні частинок, значну роль при цьому відіграє процес масовіддачі, що сприяє скороченню часу насичення порівняно з насиченням в умовах настоювання.

В роботі проведені узагальнення експериментальних даних залежності зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70 °С в режимі барботування за різних швидкостей. В результаті узагальнення експериментальних даних методом теорії подібності, виведені критеріальні рівняння, які дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі молекул цукрози через границю розділу фаз в середину частинки в різних гідродинамічних режимах. Також отримані рівняння дають змогу розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

Ключові слова: масовіддача, плід лимону, енергозбереження, насичення, настоювання, барботування.

Формулювання проблеми. Зростаючий попит на здорове харчування в Україні за останній час стимулював дослідження, направлені на збереження якості готових продуктів під час їх тривалого зберігання. Вплив попередньої обробки продуктів харчування на їх зберігання має бути максимально безпечним для здоров'я людей. Саме тому, дана стаття присвячена вирішенню проблеми насичення частинок плодів лимону безпечним консервантом – цукрозою за мінімальний проміжок часу за умов максимального енергозбереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори статті [1] досліджують процеси збагачення біоактивними речовинами та цукрозою кубиків папаї, а саме: втрати води, приріст твердих речовин, зміна загальних антиоксидантних властивостей. Дослідження проводилися в межах температур 45 °С – 65 °С, узагальнення експериментальних досліджень проводилося на основі напіваналітичного рішення нестационарного рівняння дифузії. В статті [2] наведені результати експериментальних та теоретичних досліджень насичення біоактивними речовинами та цукрозою індійського аргусу та амели. Дослідження проводилися в межах концентрації цукрових розчинів 30–70 °Brix. В статті [2] доведено, що із збільшенням концентрації розчину цукрози процес зневоднення інтенсифікується, а процес насичення плодів цукрозою сповільнюється. Аналогічні висновки роблять автори робіт [3 – 4] під час дослідження процесів насичення томатів кухонною сіллю (NaCl). В статті [2] доведено, що настоювання плодів 24 години без подальшого сушіння дозволяє максимально зберегти вітамін С в готових цукатах. В роботі [5] розглядається вплив попередньої обробки цукрозою на клітинну структуру, компоненти клітинної стінки та механічні властивості частинок плоду персика, з метою виготовлення персикових чіпсів після повітряного сушіння.

Для виготовлення цукатів, автори статті [6] рекомендують використовувати плоди середньої зрілості. Під час дозрівання гарбуза спостерігається збільшення загального вмісту цукрів та каротину [6]. Також для виготовлення цукатів, рекомендують використовувати плоди фініків, бланшовані насиченою водяною парою [7]. Доведено, що така обробка не впливає на загальний вміст цукрів та вітамінний комплекс [7].

Для узагальнення експериментальних даних процесів екстрагування та насичення плодів рослинної сировини розчинними речовинами автори [8 – 10] використовували безрозмірний аналіз та аналітичне рішення рівнянь масоперенесення.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є розроблення методів насичення частинок плоду лимону, порівняння цих методів та виявлення найбільш енергоефективного; експериментальні та теоретичні дослідження процесів, їх узагальнення та виведення критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі.

Методи дослідження. Насичення цукрозою плодів лимону відбувалося наступним чином. Плоди лимону сорту «Київський» мили та нарізали на частинки циліндричної форми діаметром 0,053 м та висотою 0,007 м. Частинки бланшували 5 хв насиченою водяною парою. Бланшування паром дозволяє максимально зберегти вітамінний комплекс, зокрема вітамін С, який є нестійким [11]. Після бланшування частинки плодів лимону занурювали в ємність з сиропом, в якому вони просочувалися цукрозою до досягнення рівноважної концентрації за даних умов. Насичення частинок проводили в двох режимах. Перший – режим настоювання, сироп в стані спокою. Дослідження проводили за температур 50 °С, 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С. Вміст цукрози

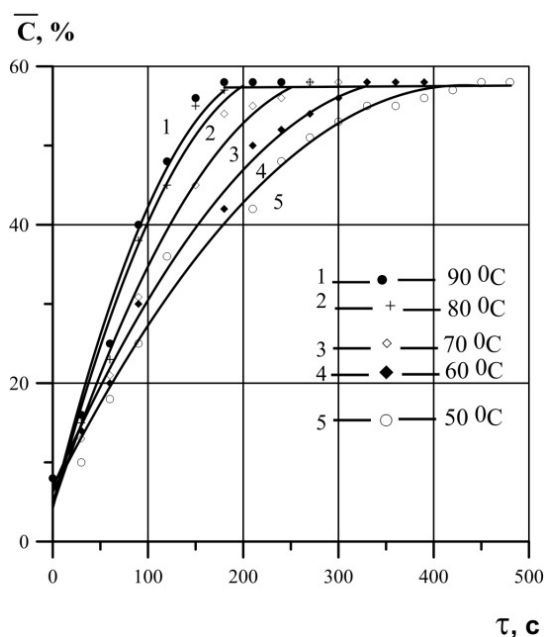


Рис. 1 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за різних температур (режим настоювання).

тур 80 °С – 90 °С відбувається випаровування води з сиропу, що спричиняє нерівномірний процес насичення. За умов температур 50 °С – 60 °С процес насичення відбувається в 2 – 3 рази повільніше. Виходячи з рис. 1., можна зробити попередній висновок про доцільність використання сиропу температурою 70 °С для насичення цукром частинок плоду лимону. Проте, остаточний висновок можливо зробити, проаналізувавши процес насичення цукром частинок плоду лимону в режимі барботування.

Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі в режимах як настоювання, так і барботування наведена на рис. 2.

Як видно з рис. 2, частинка лимону насичується цукром протягом 150с за температури 70 °С в режимі барботування, в той час, як в режимах настоювання частинка лимону насичується цукром протягом 180с за температури 90 °С, що свідчить про значну перевагу процесу насичення в умовах барботування.

Розрахуємо енергетичні затрати на процес насичення в умовах настоювання та барботування: затрати на підігрів сиропу до встановленої темпера-

в частинках визначали рефрактометричним методом через певні проміжки часу [12]. Другий – режим барботування, об'єм сиропу барботується повітрям через дренажну тарілку. Частинки плоду лимону при цьому знаходяться на решітці, занурені в сироп над дренажною тарілею. Дренажні отвори тарелі та отвори решітки, на якій знаходяться частинки лимону, мають отвори 0,005 м. Дослідження в режимі барботування проводили за температури 70 °С та витратах повітря ($\text{м}^3/\text{с}$): $6,25 \cdot 10^{-5}$; $8,06 \cdot 10^{-5}$; $12,5 \cdot 10^{-5}$; $15,6 \cdot 10^{-5}$, що відповідає швидкості через отвори: 3 м/с; 4 м/с; 6,5 м/с; 8 м/с відповідно. Вміст цукрози в частинках, аналогічно до першого режиму, визначали рефрактометричним методом через певні проміжки часу [13]. Об'єм сиропу становив 0,002 м^3 . Для кожного експерименту в сироп занурювали частинки кількістю 40 шт. Таке об'ємне співвідношення (1:5,5) дає можливість збереження сиропу незмінної концентрації з одночасним насиченням цукрозою частинок плодів.

Виклад результатів та їх аналіз. Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за різних температур сиропу (режим настоювання) наведена на рис. 1. Як видно з рис. 1., частинка лимону насичується цукром протягом 180с за температури 90 °С, протягом 210с за температури 80 °С та протягом 270с за температури 70 °С. Тобто, зростання температури від 80 °С до 90 °С несуттєво впливає на процес. Крім того за умов темпера-

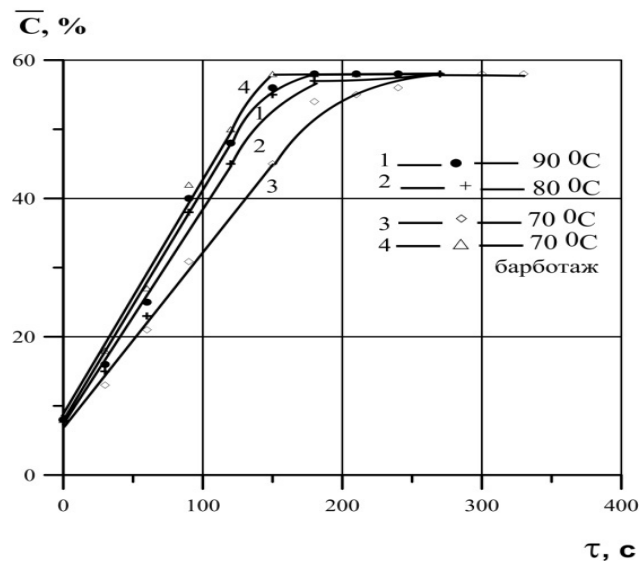


Рис. 2 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температур 70 °С, 80 °С, 90 °С (режим настоювання) та температури 70 °С (режим барботування, швидкість повітря 6,5 м/с)

тури та на процес насичення до моменту досягнення рівноваги (Q); затрати вентилятора для подачі повітря на барботування ($Q_{\text{вент}}$); затрати калорифера на нагрів повітря (Q_k), сумарні затрати (ΣQ). Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Питомі енергозатрати (кДж/кг_{сиропу}) досліджуваних режимів насичення частинок лимону в розчині цукрози

режим	t, C	$\tau_{\text{нагріву}}$, c	$\tau_{\text{насич.}}$, c	Q , кДж/кг	$Q_{\text{вент.}}$, кДж/кг	Q_k , кДж/кг	ΣQ , кДж/кг
барботування	70	3600	150	6,667	0,748	0,938	8,353
настоювання	70	3600	270	12,1	0	0	12,1
	80	4000	210	10,08	0	0	10,08
	90	4700	180	8,579	0	0	8,579

Як видно з таблиці 1, найменші енергозатрати ($\Sigma Q = 8,353$ кДж/кг_{сиропу}) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу температурою 70 °C повітрям швидкістю 6,5 м/с. Це підтверджує економічну доцільність проведення процесу насичення в умовах барботування сиропу температурою 70 °C.

Наведемо результати експериментальних та теоретичних досліджень процесу насичення частинок лимону цукрозою з її водного розчин температурою 70 °C в режимі барботування сиропу повітрям за різних швидкостей.

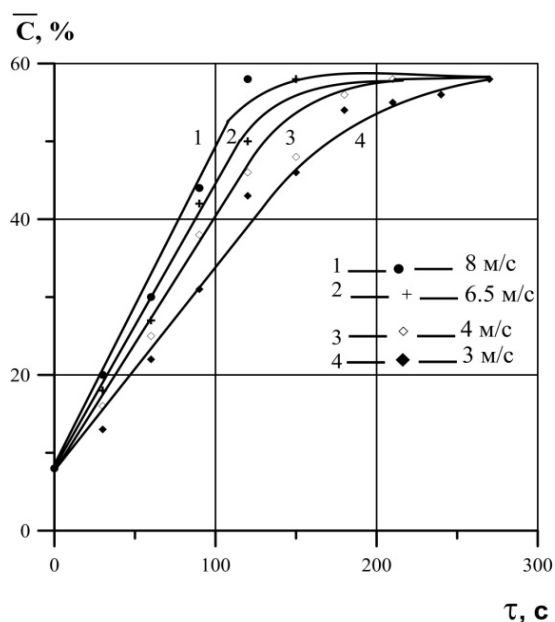


Рис. 3 – Залежність зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70 °C в режимі барботування

Як видно з рис.3, збільшення швидкості барботування сиропу сприяє швидкому процесу насичення. Проте, як показує експеримент, за умов швидкості барботування 8 м/с відбувається винесення краплин сиропу з зони насичення. Саме тому, найбільш доцільною швидкістю барботування сиропу була обрана швидкість 6,5 м/с. Як видно з рис. 2, на початку процесу насичення концентрація цукрози в частинці лимону зростає швидше, далі процес сповільнюється. Для визначення часових меж різних етапів процесу насичення наведемо графіки залежності зміни швидкості насичення від концентрації та в часі (рис. 4). Як видно з рис. 3., на початку процесу швидкість насичення зменшується. На цьому етапі відбувається процес масовіддачі молекул цукрози з барботуючого розчину до поверхні частинок. Лімітуючою стадією при цьому буде дифузійний процес з пограничного нерухомого шару сиропу, який утворюється навколо частинки в середину самої частинки. На цьому етапі значну роль буде відігравати процес масовіддачі, що сприяє скороченню часу насичення порівняно з насиченням в умовах настоювання. Тривалість цього етапу – τ_n (рис. 4(б)), зміна концентрації при цьому – $c_n - c_0$ (рис. 4(а)).

Наступна ділянка кривої (рис. 4.) відображує процес постійної швидкості насичення. На цьому етапі відбувається насичення цукрозою пор та капілярів співрозмірних між собою в середині частинок плоду лимону. Під час насичення за умов постійної швидкості, переміщення частинок цукрози в середині плоду шляхом

масовіддачі є незначним, а суттєву роль відіграє процес молекулярної дифузії. Найповільніша стадія насичення – остання ділянка на кривих (рис. 4) – прагнення концентрації цукрози в плодах лимону до рівноваги, що відбувається виключно шляхом молекулярної дифузії.

Виходячи з аналізу кривих швидкості насичення (рис.4), процес масовіддачі розглядається в проміжку часу τ_n (рис. 4(б)).

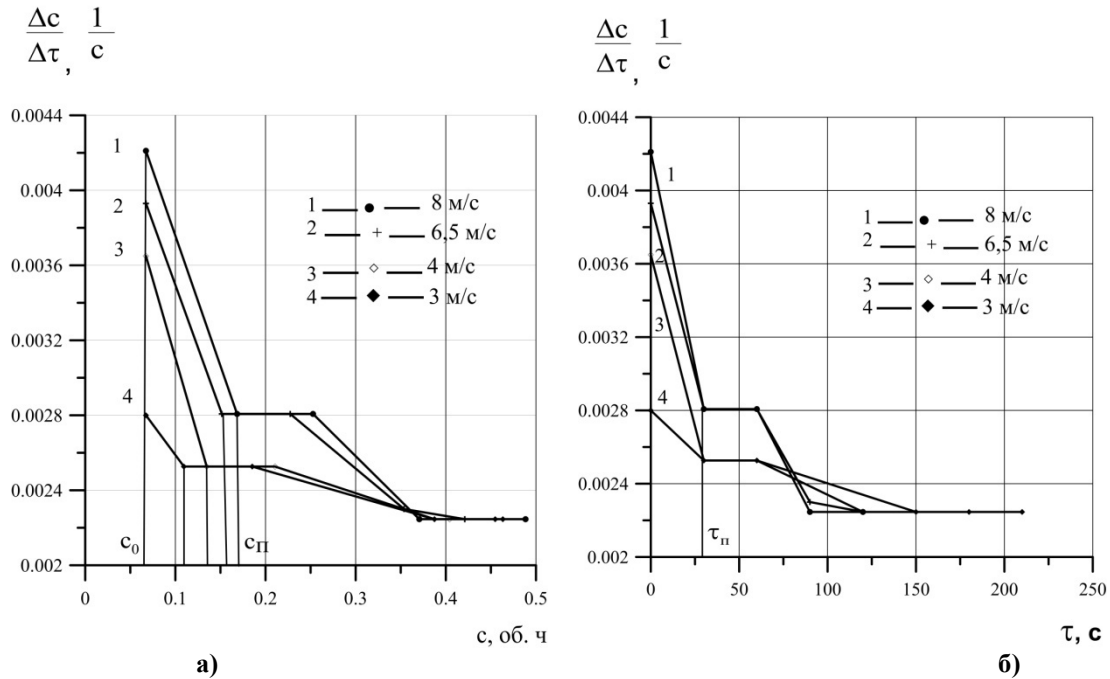


Рис. 4 – Залежності зміни швидкості насичення від концентрації (а) та в часі (б)

Проведемо узагальнення експериментальних даних залежності зміни концентрації цукрози в плодах лимону в часі за температури 70°C в режимі барботування. Узагальнення проводились на основі законів Фіка [12 – 13].

На поверхні частинок плоду лимону одночасно відбувається масовіддача та дифузія [12 – 13]:

$$\beta \cdot (c - c_n) = -D_n \cdot \frac{dc}{dn} \quad (1)$$

Коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta = \frac{V_n}{F \cdot (c - c_n)} \quad (2)$$

Ефективний коефіцієнт дифузії навколо частинки:

$$D_n = \frac{V_n}{F} \cdot \frac{c_n - c_0}{R} \quad (3)$$

де V_n – об'єм цукрози, яка продифундувала з сиропу до поверхні частинки, м³/с;

F – зовнішня площа циліндричної поверхні частинки плоду лимону, м²;

R – еквівалентний радіус частинки, м.

Критерій Шервуда на основі рівнянь (1 – 3) для процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D_n} \quad (4)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі від середовища цукрового сиропу до поверхні частинки плоду лимону, м/с

d_e – еквівалентний діаметр циліндричної частинки плоду лимону, м;

R – поверхня циліндричної частинки плоду лимону, м.

Як відомо [14], процес масовіддачі залежить від гідродинамічних умов процесу та від властивостей середовища, в якому відбувається процес. Тобто, критерій Шервуда (Sh) прямо пропорційний критерію Рейнольдса (Re) і Шмідта (Sc) [14]. Якщо критерій Шмідта (Sc) в умовах експерименту є величиною сталою, то для узагальнення експериментальних даних методом теорії подібності, застосуємо критерій Пекле дифузійний ($Pe_d = Re \cdot Sc$) [14]. Залежність критерію Шервуда (Sh) від Пекле дифузійного (Pe_d) зображена на рис. 5.

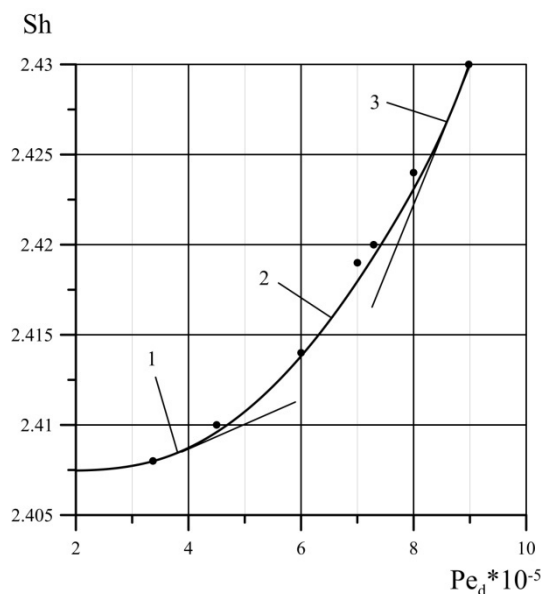


Рис. 5 – Узагальнення процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою за температури 70 °С при зміні швидкості подачі повітря на барботування

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

Перший режим – ділянка 1, за умов незначної турбулізації потоку. При значеннях $Re < 44\,000$ та $Pe_d < 4,5 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.407 + 1.1 \cdot 10^{-14} \cdot Pe_d^{1.9} \quad (5)$$

Другий режим – ділянка 2, за умов збільшення турбулізації потоку. При значеннях $44\,000 < Re < 72\,000$ та $4,5 \cdot 10^5 < Pe_d < 8,2 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.1 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot Pe_d^{1.5} \quad (6)$$

Третій режим – ділянка 3, за умов максимальної турбулізації потоку. При значеннях $Re > 72\,000$ та $Pe_d > 8,2 \cdot 10^5$ ділянка кривої (рис. 5) добре описується співвідношенням:

$$Sh = 2.4 - 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot Pe_d^{1.1} \quad (7)$$

Критеріальні рівняння (5 – 7) дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі молекул цукрози через границю розділу фаз в середину частинки. Також рівняння (5 – 7) дають змогу розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

Висновки. В статті досліджено два режими насичення частинок плодів лимону цукрозою з її водного розчину. Доведено, що в режимі барботування сиропу повітрям насичення цукрозою частинок відбувається більш інтенсивно. Визначено енергетичні затрати на процес настоювання за різних температур та на процес барботування. Встановлено, що найменші енергозатрати ($\Sigma Q = 8,353$ кДж/кг_{сиропу}) будуть під час насичення частинок лимону цукрозою за умов барботування сиропу температурою 70°C повітрям швидкістю 6,5 м/с, що підтверджує економічну доцільність проведення процесу насичення в умовах барботування сиропу.

Наведено узагальнення результатів експериментальних досліджень процесу насичення частинок плоду лимону цукрозою за температури 70°C при зміні швидкості подачі повітря на барботування. В результаті узагальнення виведені критеріальні рівняння (5 – 7) для різних гідродинамічних режимів, які дають змогу розрахувати коефіцієнт масовіддачі для різних режимів барботування сиропу. За допомогою рівнянь 5 – 7 можливо розрахувати кількість цукрози, яка переходить з сиропу в частинку плоду лимону шляхом масовіддачі.

References

1. Mariana Aguirre-García, Orlenda Cortés-Zavaleta, Paola Hernández-Carranza, Héctor Ruiz-Espinosa, Carlos Enrique Ochoa-Velasco, Irving Israel 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>.
2. Sachin R. Adsare, Ashwini N. Bellary, H.B. Sowbhagya, Revathy Baskaran, Maya Prakash, Navin K. Rastogi. (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>.
3. V.R.N. Telis, R.C.B.D.L. Murari, F. Yamashita. (2004). Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. Journal of Food Engineering, 61(2), 253-259. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00097-9).

4. Berta Zecchi, Patricia Gerla. (2020). Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 274, 109821. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109821>.
5. Chun-ju Liu, You-lin Xue, Jia Guo, Han-ci Ren, Song Jiang, Da-jing Li, Jiang-feng Song, Zhong-yuan Zhang. (2021). Citric acid and sucrose pretreatment improves the crispness of puffed peach chips by regulating cell structure and mechanical properties. *LWT*, 142, 111036. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111036>.
6. Genilza Almeida da Graça, Pryanka Thuyra Nascimento Fontes, Alysson Caetano Soares, Mônica Silva de Jesus, Patrícia Nogueira Matos, Maria Terezinha Santos Leite Neta, Adriano do Nascimento Simões, Luciana Marques de Carvalho, Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior, Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi, Aline de Almeida Vasconcelos. (2024). Characterization of growth and development of pumpkin cv Mini Jack fruits. *Food Chemistry Advances*, 5, 100743 <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100743>.
7. Sarra Cherif, Alexandre Leca, Sylvie Bureau, Jameleddine Ben Abda, Carine Le Bourvellec. (2024). Does hydration of 'Deglet Nour' date palm fruits improve their quality and help to reduce waste? *Food Chemistry*, 458, 140323 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140323>.
8. K. Castillo-Santos, I.I. Ruiz-López, G.C. Rodríguez-Jimenes, J. Carrillo-Ahumada, M.A. García-Alvarado. (2017). Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, 192, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.020>.
9. 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>
10. 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>
11. Manoj Kumar Solanki, Zhen Wang, Amit Kaushik, Vipin Kumar Singh, Rajib Roychowdhury, Manish Kumar, Dharmendra Kumar, Joginder Singh, Sandeep Kumar Singh, Bhavana Dixit, Ajay Kumar. (2024). From orchard to table: Significance of fruit microbiota in postharvest diseases management of citrus fruits. *Food Control*, 165, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110698>.
12. 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>
13. 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>
14. 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>

ENERGY-SAVING REGIMES FOR SATURATING LEMON FRUIT PARTICLES WITH SUCROSE

Iryna Huzova, PhD of Technical Sciences, Associate Professor
Volodymyr Atamanyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. This article is dedicated to solving the problem of saturating lemon fruit particles with sucrose in the shortest possible time while maximizing energy savings. The authors of the article developed regimes for saturating lemon fruit particles. The saturation was conducted in two modes. The first mode is soaking, with the syrup in a state of rest. Research was conducted at temperatures of 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C. The second mode is bubbling, where the volume of syrup is aerated through a drainage tray. The lemon fruit particles are placed on a grid submerged in the syrup above the drainage tray. Research in the bubbling mode was conducted at a temperature of 70°C and air flow rates (m^3/s): $6.25 \cdot 10^{-5}$; $8.06 \cdot 10^{-5}$; $12.5 \cdot 10^{-5}$; $15.6 \cdot 10^{-5}$, which corresponds to the speed through the drainage tray holes: 3 m/s; 4 m/s; 6.5 m/s; 8 m/s, respectively.

The authors proved that the lowest energy consumption ($\Sigma Q = 8.353 \text{ kJ/kg of syrup}$) occurs during the saturation of lemon particles with sucrose under bubbling conditions at a syrup temperature of 70°C with an air speed of 6.5 m/s, confirming the economic feasibility of this method.

The study presents and analyzes the dependencies of the saturation rate on concentration and time. The analysis shows that at the beginning of the process, the saturation rate decreases. At this stage, the process of mass transfer of sucrose molecules from the bubbling solution to the surface of the particles occurs, with the mass transfer process playing a significant role, which helps to reduce the saturation time compared to soaking conditions.

The study generalizes experimental data on the change in sucrose concentration in lemon fruits over time at a temperature of 70°C in the bubbling mode at different speeds. As a result of generalizing the experimental data using the similarity theory method, criterion equations were derived, allowing the calculation of the mass transfer coefficient of sucrose molecules through the phase boundary into the particle under various hydrodynamic regimes. The obtained equations also enable the calculation of the amount of sucrose transferred from the syrup to the lemon fruit particle through mass transfer.

Keywords: mass transfer, lemon fruit, energy saving, saturation, soaking, bubbling.

Список використаної літератури

1. Mariana Aguirre-García, Orlenda Cortés-Zavaleta, Paola Hernández-Carranza, Héctor Ruiz-Espinosa, Carlos Enrique Ochoa-Velasco, Irving Israel Ruiz-López. Modeling the impregnation of roselle antioxidants into papaya cubes // *Journal of Food Engineering*. 2023. 357. P. 111585.
2. Sachin R. Adsare, Ashwini N. Bellary, H.B. Sowbhagya, Revathy Baskaran, Maya Prakash, Navin K. Rastogi. Osmotic treatment for the impregnation of anthocyanin in candies from Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) // *Journal of Food Engineering*. 2016. 175. P. 24-32.
3. V.R.N. Telis, R.C.B.D.L. Murari, F. Yamashita. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions // *Journal of Food Engineering*. 2004. 61(2). P. 253-259.
4. Berta Zecchi, Patricia Gerla. Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage // *Journal of Food Engineering*. 2020. 274. P. 109821.
5. Chun-ju Liu, You-lin Xue, Jia Guo, Han-ci Ren, Song Jiang, Da-jing Li, Jiang-feng Song, Zhong-yuan Zhang. Citric acid and sucrose pretreatment improves the crispness of puffed peach chips by regulating cell structure and mechanical properties // *LWT*. 2021. 142. P. 111036.
6. Genilza Almeida da Graça, Pryanka Thuyra Nascimento Fontes, Alysson Caetano Soares, Mônica Silva de Jesus, Patrícia Nogueira Matos, Maria Terezinha Santos Leite Neta, Adriano do Nascimento Simões, Luciana Marques de Carvalho, Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior, Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi, Aline de Almeida Vasconcelos. Characterization of growth and development of pumpkin cv Mini Jack fruits // *Food Chemistry Advances*. 2024. 5. P. 100743
7. Sarra Cherif, Alexandre Leca, Sylvie Bureau, Jameleddine Ben Abda, Carine Le Bourvellec. Does hydration of 'Deglet Nour' date palm fruits improve their quality and help to reduce waste? // *Food Chemistry*. 2024. 458. P. 140323
8. K. Castillo-Santos, I.I. Ruiz-López, G.C. Rodríguez-Jimenes, J. Carrillo-Ahumada, M.A. García-Alvarado. Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling // *Journal of Food Engineering*. 2017. 192. P. 36-44.
9. Gumnitsky, J., Venger, L., Sabadash, V., Hyvlud, A., Gnativ, Z. Physical And Mathematical Models Of Target Component Extraction From Rectlinear Capillaries // *Chemistry and Chemical Technology*. 2022. 16(1). P. 112-117.
10. Fedoryshyn, O.M., Petrina, R.O., Krvavych, A.S., Hubrii, Z.V., Atamanyuk, V.M. Research on aspects of the extraction kinetics of metabolites of carlina acaulis while mixing // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023.1. P. 3-10.
11. Manoj Kumar Solanki, Zhen Wang, Amit Kaushik, Vipin Kumar Singh, Rajib Roychowdhury, Manish Kumar, Dharmendra Kumar, Joginder Singh, Sandeep Kumar Singh, Bhavana Dixit, Ajay Kumar. From orchard to table: Significance of fruit microbiota in postharvest diseases management of citrus fruits // *Food Control*. 2024. 165. P. 110698
12. Huzova I. Study on the diffusion process of zucchini fruits saturation with sucrose from an aqueous solution // *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. 31(3). P. 552-562.
13. Atamanyuk V., Huzova I., Gnativ Z. Study of diffusion processes in pumpkin particles during candied fruits production // *Food Science and Technology*. 2017. 11(4). P. 21-28.
14. Huzova I., Atamanyuk V. 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*. 2023. 16(4). P. 56-63.

Отримано в редакцію 14.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 14.07.2024
Approved 25.09.2024