

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

І. О. Гузьова, В. М. Атаманюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженеріїДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАСИЧЕННЯ ЦУКАТІВ
В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ<https://doi.org/10.23939/ctas2020.02.102>

Розглянуто процес насичення цукрозою частинок плодів гарбуза. Розроблено експериментальну установку насичення частинок плодів цукром в умовах інтенсивного пневматичного перемішування. Отримані кінетичні залежності насичення цукатів та зміни концентрації цукрового сиропу за різних температур. Проведене порівняння умов насичення за різних співвідношень “цукат : сироп”. Математичним узагальненням підтверджено обране авторами статті співвідношення “цукат : сироп”. Згідно з обраною математичною моделлю, проведено узагальнення результатів досліджень насичення частинок плодів гарбуза цукром в умовах зміни в часі концентрації як цукатів та і сиропу.

Ключові слова: цукати, сироп, дифузія, пневматичне перемішування, насичення.

Вступ

Овочі та фрукти є цінними продуктами харчування, оскільки містять велику кількість біологічно активних речовин, вітамінів, мінеральних солей та органічних кислот. Одним із корисних продуктів переробки плодів є цукати. За якісних умов промислової переробки рослинної сировини, готові цукати будуть містити в собі весь комплекс поживних речовин та зберігатися тривалий час [1]. Основним процесом виробництва цукатів є процес насичення плодів цукровим сиропом. Такий процес є довготривалим в часі та потребує великих температур та великих витрат сиропу [2]. Саме тому аналіз кінетичних процесів насичення цукатів в промислових умовах дасть змогу на основі експериментальних та теоретичних досліджень встановити умови перебігу процесу з мінімальною витратою сиропу та за оптимальних температур.

Авторами [3 – 4] проводилися дослідження процесів виробництва пектиновмісних цукатів. Автори [3] стверджують, що нарізані частинки плодів необхідно витримувати в киплячому цукровому сиропі, тоді, як автори [4] температурою насичення плодів цукрозою вважають 60 – 75⁰С. В процесі насичення плодів цукрозою важливим є співвідношення “цукат : сироп”, при якому витрата сиропу та час насичення мають бути мінімальними та не впливати на якість

готового продукту. Так, в роботах [4 – 5] пропонується співвідношення “цукат : сироп = 1:2(2.5)”, що прийнято в промислових умовах в традиційних технологіях [6]. Саме тому, актуальним є створення оптимальних умов насичення та температурних режимів під час виробництва цукатів.

Метою досліджень є:

Визначення впливу співвідношення кількості цукрового сиропу до кількості частинок плодів гарбуза на час та якість насичення. Вибір математичної моделі, що дає змогу визначити час насичення частинок плоду гарбуза цукром в промислових умовах перемішування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Встановити можливе для промислових умов співвідношення “цукат : сироп” з мінімальним використанням сиропу.

2. За умов встановленого співвідношення, дослідити зміну концентрації цукрози як в сиропі, так і в плодах гарбуза за умов різних температур.

3. На основі обраної математичної моделі, узагальнити отримані в умовах перемішування кінетичні криві. Перевірити модель на адекватність.

4. Встановити математичну залежність, яка може бути використана для розрахунку часу насичення частинок гарбуза цукром.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом досліджень були частинки однакових розмірів кубічної форми (ребром 10 мм) з плодів гарбуза сорту "Стофунтовка Вассма" вирощеного в західних областях України. Насичення частинок гарбуза цукром відбувалося в цукровому сиропі з початковою концентрацією 70 % (мас.) на установці, схема якої наведена на рис. 1.

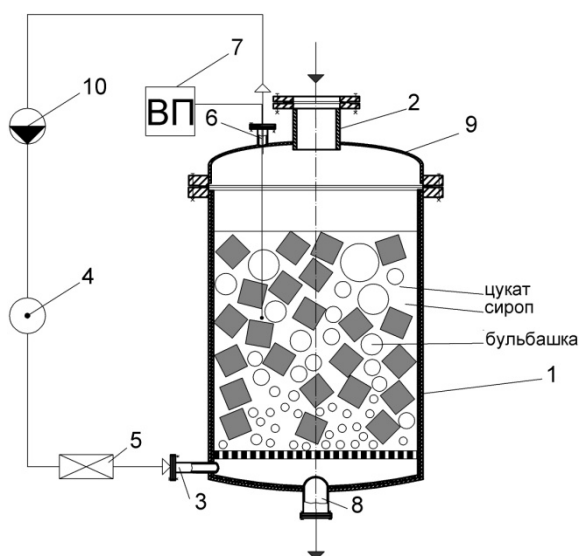


Рис. 1. Схема установки насичення частинок гарбуза цукром: 1 – корпус циліндра; 2 – штуцер для подачі цукрового сиропу та частинок гарбуза; 3 – патрубок подачі стиснутого повітря; 4 – вентилятор; 5 – калорифер; 6 – патрубок для виходу повітря; 7 – прилад для вимірювання температури; 8 –штуцер для зливу сиропу; 9 – кришка; 10 – кранлевдбійник.

Установка працює таким чином. В циліндричний емальований корпус 1 через штуцер 2 заливають цукровий сироп, підігрітий до заданої температури. Через патрубок 3 у циліндр подають стиснуте повітря температурою, рівною температурі сиропу. Повітря подається вентилятором 4, нагрівається калорифером 5. Виходить повітря з апарату через штуцер 6. Коли, за допомогою терморпарі, прилад 7 зафіксує задану температуру, в емальований корпус 1 через штуцер 2 завантажують частинки бланшованого гарбуза. Таким чином в циліндрі відбувається пневматичне інтенсивне перемішування частинок гарбуза з цукровим сиропом. Коли частинки

насичуються цукром до необхідної концентрації, вимикається подача повітря, а сироп зливається через штуцер 8. Для вивантаження готових цукатів необхідно відкрити кришку 9.

Температура фіксується восьмиканальним термоелектричним перетворювачем ПТ-108.

Підготовка сировини здійснюється таким чином: гарбуз ділять на частини, звільняють від шкірки і внутрішньої плівки, розрізають на кубики однакових розмірів: 10x10x10 мм. Потім визначають вміст цукру, після чого бланшують 10 хв. Також проводять визначення вмісту цукру.

Сироп готується так: до 700 г кристалічного цукру, додають 300 мл води, нагрівають до повного розчинення. Таким чином концентрація цукру в сиропі становить 70 % (мас). Маса сиропу становить 1000 г.

Наступний етап: попередньо зважують усі кубики бланшованого гарбуза і 730 г завантажують в сироп. Таким чином: співвідношення маси плодів до маси сиропу становить 1:1,37. Кожні 30 хв відбирають проби частинок плодів гарбуза та проби сиропу.

Дослідження проводиться за умов температур 40 °С, 60 °С, 80 °С. Діапазон температур вибраний, виходячи з дотримання високої якості готового продукту. Для більшої точності один й той самий дослід проводиться 3 рази.

Вміст цукру в плодах та в сиропі визначається рефрактометричним методом згідно з методикою, описаною в [7] за допомогою рефрактометра марки ИРФ-454 Б2М.

Результати досліджень та їх обговорення

У статті наведено результати дослідження зміни концентрації сиропу та цукатів в часі за умов співвідношення маси плодів до маси сиропу 1:1,37.

Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 40°С наведена на рис. 2.

З рис. 2 видно, що рівноважні концентрації сиропу та цукатів досягаються після 3000 хвилин. Рівноважна концентрація цукрози в сиропі становить 0,55 кг_{цукр.}/кг_{заг.}, концентрація цукрози в цукатах – 0,25 кг_{цукр.}/кг_{заг.}. Бачимо, що концентрація сиропу зменшується незначно, тобто сироп змінює свої якісні характеристики, проте використовується не повністю. Цукат насичується недостатньо.

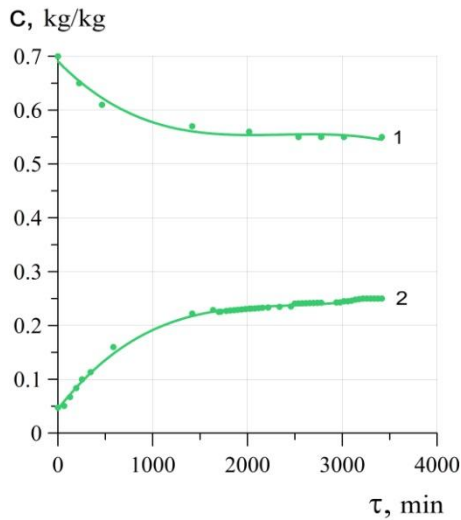


Рис. 2. Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 40°C

Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 60°C наведена на рис. 3.

З рис. 3 видно, що рівноважні концентрації сиропу та цукатів досягаються після 2100 хвилин. Рівноважна концентрація цукрози в сиропі становить 0,46 кг_{цукр.}/кг_{заг.}, концентрація цукрози в цукатах – 0,376 кг_{цукр.}/кг_{заг.}. Бачимо, що концентрація сиропу значно зменшується та наближається до рівноважної концентрації цукатів.

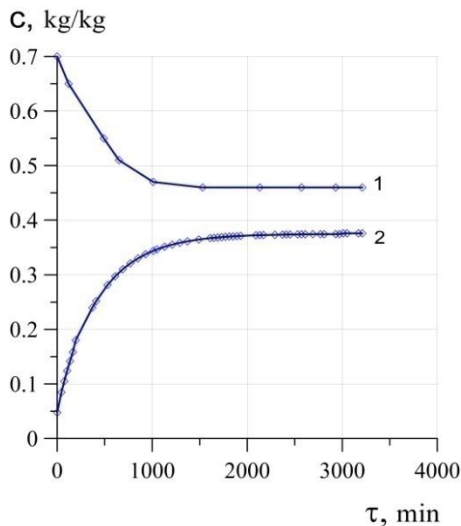


Рис. 3. Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 60°C

Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 80°C наведена на рис. 4.

З рис. 4 видно, що рівноважні концентрації сиропу та цукатів досягаються після 1800 хвилин. Рівноважна концентрація цукрози в сиропі становить 0,43 кг_{цукр.}/кг_{заг.}, концентрація цукрози в цукатах – 0,425 кг_{цукр.}/кг_{заг.}. Бачимо, що концентрація сиропу значно зменшується та після 1800 хвилин асимптотично наближається до рівноважної концентрації цукатів. Цукат при цьому насичується до максимально можливої за даних умов величини.

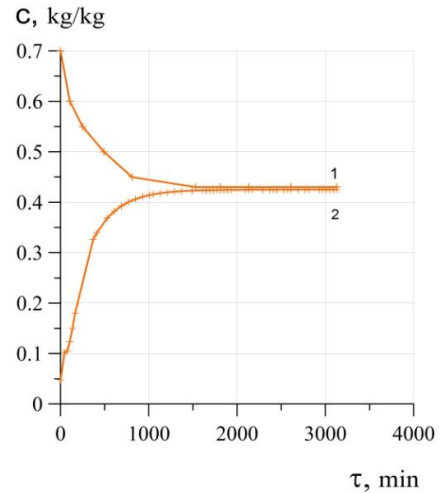


Рис. 4. Кінетична крива насичення цукатів (2) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 80°C

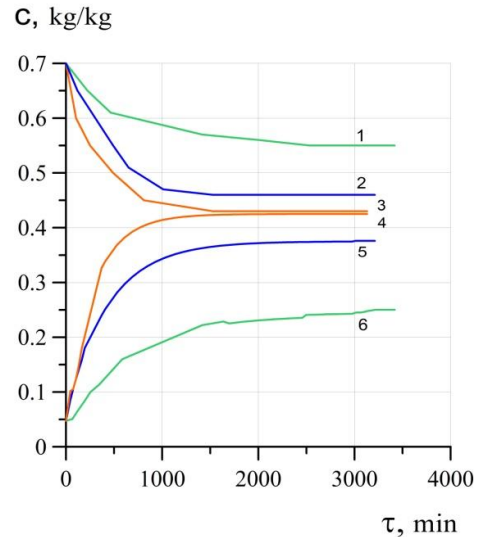


Рис. 5. Кінетичні криві:

- насичення цукатів (6) та зміни концентрації сиропу (1) за температури 40°C;
- насичення цукатів (5) та зміни концентрації сиропу (2) за температури 60°C;
- насичення цукатів (4) та зміни концентрації сиропу (3) за температури 80°C

Графічне порівняння кінетичних кривих насичення цукатів та зміни концентрації сиропу за температур 40 – 80°C наведено на рис. 5.

З рис. 5 видно, що кінетичні криві насичення цукатів (криві 4 – 6) та зміни концентрації сиропу (криві 1 – 3) за температур 40 – 80°C носять симетричний характер. За температур 60 °C та 80 °C рівноважна концентрація в частинках цукатів (криві 4 – 5) досягається набагато швидше, ніж за умов 40 °C (крива 6). Таке явище пояснюється тим, що за температур > 50°C значно зростає коефіцієнт масопровідності [8], що сприяє значному збільшенню швидкості дифузійних процесів в клітинах плодів гарбуза. За температури 80 °C досягається максимальна концентрація цукрози в цукатах (крива 4), а концентрація цукрози в сиропі (крива 3) асимптотично наближається до рівноважної концентрації цукатів (крива 4). Таким чином, процес насичення цукатів цукрозою необхідно проводити за температури 80 °C. Збільшення температури не є доцільним, це призведе до перевитрати енергії та погіршення якості готового продукту.

Співвідношення “цукат : сироп = 1:1,37” було обрано, згідно з аналізом наукових даних, які наведено в таблиці.

Умови проведення насичення цукатів

Співвідношення “цукат : сироп”	Характеристики насичення
1:5	Концентрація сиропу незмінна. Сироп не змінює свої якісні та кількісні характеристики, час насичення цукатів мінімальний за умов значної перевитрати сиропу. [8]
1:2(2,5)	Рекомендовані промислові умови. Сироп змінює свої якісні та кількісні характеристики, час насичення цукатів зростає за умов перевитрати сиропу [4 – 5]
1:1 та менше	Не рекомендовано. Цукати не досягають необхідної концентрації [5]

Із співвідношенням “цукат : сироп = 1:5” в статті [8] проводилися експериментальні дослідження кінетики насичення частинок плодів бланшованого гарбуза “Стофунтовка Вассма”. Порівняння кінетичних кривих, які отримали за умов насичення 1:5 та 1:1,37 ($t=80^{\circ}\text{C}$) наведено на рис. 6.

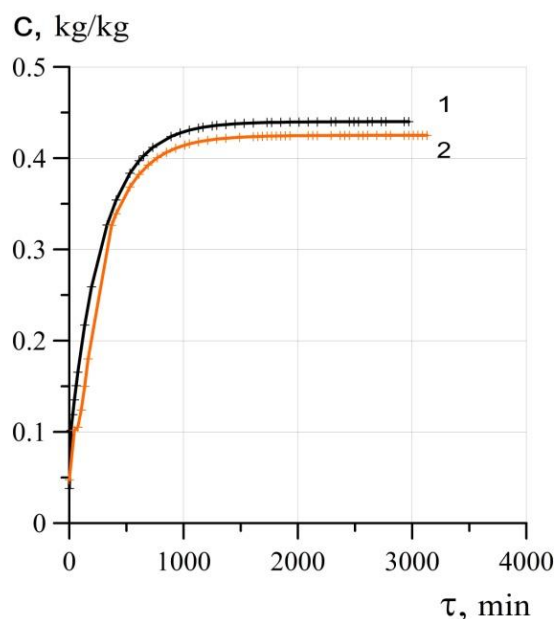


Рис. 6. Кінетична крива насичення цукатів за температури 80°C:

- за умов співвідношенням “цукат : сироп = 1:5” (крива 1)
- за умов співвідношенням “цукат : сироп = 1:1,37” (крива 2)

Як бачимо з рис. 6, крива 1 наближається до рівноважної концентрації після 1500 хвилин, а крива 2 – після 1800 хвилин. Тобто при співвідношенні “цукат : сироп = 1:1,37” цукат насичується незначно повільніше, ніж при співвідношенні “цукат : сироп = 1:5”. Саме тому, не має необхідності створювати умови насичення при співвідношенні “цукат : сироп = 1:2(2,5)” (табл.). Таке співвідношення призведе до перевитрати сиропу, а час насичення майже не відрізнятиметься від часу насичення при співвідношенні “цукат : сироп = 1:5”.

Отже, авторами статті запропоновано під час насичення цукрозою бланшованих плодів гарбуза використовувати співвідношення “цукат : сироп = 1:1,37”. За таких умов час насичення цукатів майже не відрізняється від умов, прийнятих в промисловості (“цукат : сироп = 1:2(2,5)”), проте призводить до значного зменшення витрати сиропу.

Співвідношення “цукат : сироп = 1:1,37” підтверджується наступними математичними узагальненнями. Експериментальна установка (рис. 1) працює в умовах, наближених до умов ідеального змішування. Схема процесу ідеального змішування зображена на рис. 7.

В установку надходить V масових одиниць сиропу та W масових одиниць плодів. На початку пневматичного перемішування частинки плодів перейдуть у зважений стан і кожна з них буде оточувати рідина. Почнеться перехід цукрози з сиропу через поверхню в об'єм пористого тіла частинок плоду гарбуза кубічної форми.

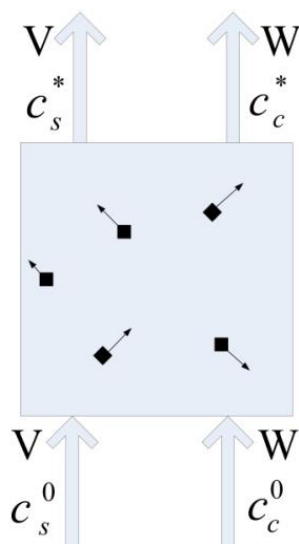


Рис. 7. Схема процесу ідеального змішування

Процес дифузії цукрози в самому об'ємі є процесом масопровідності, швидкість якого лімітується дифузійними процесами та визначається коефіцієнтом масопровідності D_m .

Протягом усього процесу насичення концентрація цукрози в цукатах буде зростати від початкової концентрації c_c^0 до рівноважної c_c^* , а концентрація цукрози в сиропі буде зменшуватися від початкової концентрації c_s^0 до рівноважної c_s^* . Протягом усього часу насичення справедливим є балансове рівняння (1).

$$V(c_s^0 - c_s^*) = W(c_c^* - c_c^0) \quad (1)$$

В будь який момент часу справедливим є балансове рівняння (2).

$$V(c_s^0 - c_s) = W(c_c^* - c_c)$$

приймемо $b = \frac{V}{W}$, тоді

$$b \cdot (c_s^0 - c_s) = (c_c^* - c_c) \quad (2)$$

Таким чином, концентрація цукрози в рідкій фазі в будь який момент часу буде відпо-

відати певній концентрації цукрози в пористому тілі цукатів. Саме тому, окремо рівняння (2) не може бути розв'язане.

Кінетику дифузійних процесів описує закон Фіка [9]:

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

Після приєднання крайових умов:

$$\tau = 0; c_c = c_c^0 = const$$

$$c_c = c_c^*$$

розв'язком рівнянь (2 – 3) для замкненої системи будуть залежності (4 – 5)

$$\frac{c_c^* - c_c}{c_c^* - c_c^0} = A_n \cdot e^{-s_n \cdot Fo} \quad (4)$$

або

$$\frac{c_c^* - c_c}{b \cdot (c_s^0 - c_s^*)} = A_n \cdot e^{-s_n \cdot Fo} \quad (5)$$

де $Fo = \frac{D_m^T \cdot \tau}{R^2}$ – критерій Фур'є, τ – біжучий час,

R – характерний розмір. У випадку проведеного експерименту, R це еквівалентний радіус частинки кубічної форми, м.

В роботі [8] авторами статті визначений коефіцієнт масопровідності D_m^T , D_m для бланшованих плодів гарбуза сорту “Стофунтовка Васма” (рівняння 6 – 7), котрий залежить від температури та природи самого плоду та не залежить від умов перебігу процесу, концентрації сиропу та співвідношення “цукат : сироп”.

$$D_m^T = 2.2 \cdot 10^{-3} \cdot D_m^{293} \cdot e^{0.02 \cdot T} \quad (6)$$

$$D_m^{293} = 2.63 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 / \text{с} \quad (7)$$

Важливим є визначення коефіцієнтів A_n та s_n (рівняння 4 – 5). За умов проведення експерименту усі частинки були однакових розмірів і однакової кубічної форми ($n=1$).

В самому об'ємі відбувається процес масопровідності, швидкість якого лімітується внутрішніми дифузійними процесами та визначається коефіцієнтом масопровідності D_m . Отже, коефіцієнт A буде залежити від форми зовнішньої поверхні частинки, а коефіцієнт s – від форми об'єму.

Використовуючи рівняння (4 – 5) проведемо узагальнення результатів досліджень

насичення частинок плодів гарбуза цукром в умовах зміни в часі концентрації як цукатів та і сиропу. Побудувавши графік залежності зміни концентрацій від безрозмірного часу (рис. 8), бачимо, що всі експериментальні точки в межах температур 40⁰С – 80⁰С узагальнюються однією кривою. В результаті апроксимації, що проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10, отримана аналітична експоненціальна залежність, яка має вигляд:

$$\frac{c_c^* - c_c}{b \cdot (c_s^0 - c_s^*)} = 0.77 \cdot e^{-2.6 \cdot Fo} \quad (8)$$

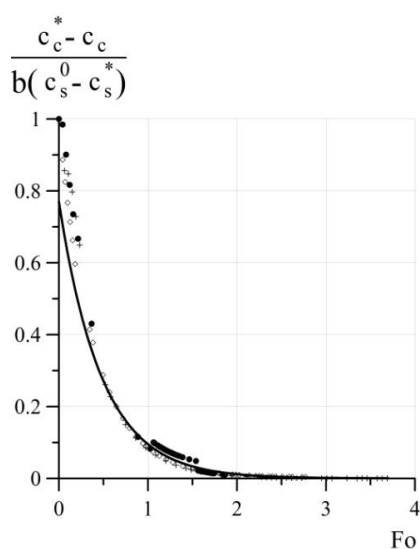


Рис. 8. Крива узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в цукатах та сиропі в часі за температур 40 °С; 60 °С; 80 °С

Залежність (8), отримана на основі обраної авторами математичної моделі є адекватною та дозволяє розрахувати час насичення бланшованих плодів гарбуза кубічної форми сорту “Стофунтовка Вассма” в умовах зміни температури до 100⁰С.

Висновки

Розроблено методику насичення бланшованих частинок плодів гарбуза “Стофунтовка Вассма” з метою отримання цукатів, за умов температур 40 – 80 °С та різних співвідношень “цукат : сироп”.

Запропоновані основні параметри процесу виробництва цукатів в промислових умовах. Доведено, що процес насичення цукатів цукрозою необхідно проводити за температури 80 °С.

Запропоновано під час насичення цукрозою бланшованих плодів гарбуза використовувати співвідношення “цукат : сироп = 1:1,37”, що призводить до значного зменшення витрати сиропу у порівнянні з традиційними промисловими методами. Проведені математичні узагальнення процесів насичення в умовах, наближених до умов ідеального змішування. На основі узагальнень експериментальних даних, отримана аналітична залежність (8), яка дає змогу визначити час насичення частинок плодів гарбуза цукром та визначити рівноважні концентрації цукатів та сиропу за умов проведення експерименту.

References

1. T. Nepochatykh. (2017). Physical Properties of Vegetables as a Basis for Making Decisions on Their Technological Processing (on the Example of Zucchini). *Path of Science*, 3(8), 3020 – 3027. doi.org/10.22178/pos.25-7
2. T. Nepochatykh. (2018). Ensuring the Quality of the New Fruit and Berry Marmalade by Adding Kelp. *Path of Science*, 4(2), 3001 – 3007. doi.org/10.22178/pos.31-6
3. Krpyvnyc'ka I. O., Kushnir O. V., Dzis A. S., Obolkina V. I., Gnatenko A. M., Svincic'ka A. I. (2000). Deklaracijnyj patent na vynahid № 98126381. Sposib vyrobnyctva pektynovmisnyh cukativ. Ukraïna. [in Ukrainian]
4. Malezhyk I. F., Dubkovetskyi I. V., Bandurenko H. M., Strelchenko L. V. (2015). Deklaratsiinyj patent na korysnu model №103371. Sposib vyrobnyctva yabluchnykh tsukativ. Ukraina. [in Ukrainian]
5. A.A Bhoite. (2015). Studies on dehydration of plum using different sugar syrup treatments. *Food science research journal*, 6(2), 263 – 267. doi.org/10.15740/has/fsrj/6.2/263-267
6. Guz'ova I. O., Atamanjuk V. M. (2018). Modeljuvannja izotermichnogo reaktora dlja nasychennja saharozuju cukativ z garbuza. *Naukovi praci*, 82(1), 54–61. [in Ukrainian] doi.org/10.23939/cte2019.01.202
7. Gorelova L, Malyisheva V, Kvasenkov O. (1997). № 2092075. Sposob proizvodstva tsukatov. Russia. [in Russian].
8. 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. doi.org/10.15673/fst.v11i4.727
9. T. N. Viten'ko, Ya. M. Gumnitskii. (2006). Mass transfer during dissolution of solids using hydrodynamic cavitation devices. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 40(6), 598 – 603. doi.org/10.1134/s0040579506060078

I. O. Гузьова, В. М. Атаманюк

I.O. Huzova, V.M. Atamanyuk
Lviv Polytechnic National University,
Department of Chemical Engineering

STUDY OF KINETIC PROCESSES DURING CANDIED FRUITS INDUSTRIAL SATURATION

The process of saturation of sucrose particles of pumpkin fruits is considered. An experimental setup for saturation of fruit particles with sugar under conditions of intensive pneumatic mixing was developed. The kinetic dependences of the saturation of candied fruits and changes in the concentration of sugar syrup under various temperatures were obtained. The saturation conditions are compared for various ratios of “candied fruit: syrup”. A mathematical generalization confirms the ratio “candied fruit: syrup” selected by the authors of the article. According to the chosen mathematical model, a generalization of the results of studies on the saturation of pumpkin fruit particles with sugar under the conditions of a change in time with concentration of both candied fruit and syrup was made.

Key words: candied fruits, syrup, diffusion, pneumatic mixing, saturation.