

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НАСИЧЕННЯ ЦУКРОЗОЮ ЧАСТИНОК КОРЕНЯ МОРКВИ

Гузьова І.О., к.т.н., доцент, Атаманюк В.М., д.т.н., професор
НУ «Львівська політехніка», м. Львів

Анотація. Дифузійні процеси в харчовій промисловості відбуваються під час виробництва таких корисних продуктів, як цукати та відіграють ключову роль в таких виробництвах. Актуальним питанням є встановлення механізму дифузійних процесів та скорочення часу насичення.

В статті досліджуються дифузійні процеси насичення цукрозою частинок кореня моркви. Проаналізовано фотографії клітин сирої та бланшованої моркви. Визначено середній діаметр пор між клітинами моркви, загальну довжину каналів між клітинами та середню площу поперечного перерізу клітини моркви, а також розраховано середню площу пор між клітинами. Отримані числові значення дають змогу порівняти пористість поверхні масоперенесення для бланшованої моркви.

Проаналізована зміна концентрації частинок кореня моркви в часі в процесі насичення його цукрозою. Доведено, що температура водного розчину цукрози значно впливає на час насичення цукром кореня моркви. Зростання температури від 50°C до 90°C зменшує час насичення більше, ніж в 2 рази.

На основі результатів експерименту, розраховано коефіцієнти ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню частинки та коефіцієнти ефективної дифузії в середині частинки кореня моркви. На основі залежності коефіцієнтів дифузії від температури та рівняння Ареніуса, розраховано енергію активації процесу, яка приймає значення $E_a = 19,159$ кДж/моль та не залежить від температури, від внутрішньої структури бланшованої частинки кореня моркви, а визначає енергію, необхідну для початку масообмінного процесу насичення цукрозою частинки моркви.

Обґрунтовано механізм дифузійного перенесення цукрози з розчину великого об'єму у тверду частинку моркви. Наведено аналітичний розв'язок рівнянь для визначення зміни концентрації цукрози в частинках моркви в часі, адекватність яких перевірено експериментально. Виведена аналітична залежність дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми діаметром $d=12$ мм та висотою $h=4$ мм в межах температур 50 – 90°C.

Ключові слова: частинка кореня моркви, ефективний коефіцієнт дифузії, енергія активації

Формулювання проблеми. Дослідження дифузійних процесів в рослинній сировині є надзвичайно актуальним з точки зору виготовлення якісної продукції та енергозбереження самого процесу. Дифузійні процеси в харчовій промисловості відбуваються під час виробництва варення, джемів, цукатів, різного роду консервацій та відіграють ключову роль в таких виробництвах. Актуальним питанням є оптимізація таких процесів, скорочення часу насичення. Швидкість дифузії та ефективні коефіцієнти дифузії, як відомо, значно залежать від концентрації розчинів, температури, внутрішньої структури та форми частинок рослинної сировини. Експериментальні та теоретичні дослідження цих факторів, виведення аналітичних залежностей, дадуть змогу оптимізувати процеси та спроектувати в подальшому енергоощадне обладнання для здійснення процесів насичення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження дифузійних процесів в рослинній сировині розглядається в ряді робіт, а саме: при різних температурних режимах, досліджуються процеси дегідратації жовтого момбіну [1], грибів [2], зерна соєвих бобів [3], плодів «Героба» [4], листя *Schinus terebinthifolius* Raddi [5], визначаються коефіцієнти ефективної дифузії та енергія активації процесу дегідратації. Розробляються математичні моделі, які демонструють найкращу відповідність отриманим експериментальним даним.

В роботі [6] досліджуються процеси адсорбції екологічно чистих адсорбентів, таких як листя журавлини, материнки, лаванди. Доведено, що такий процес відбувається на основі механізму внутрішньої дифузії. Проведено узагальнення дифузійних процесів, на основі обраної моделі Ленгмюра та Френдліха.

В статті [7] розглядається кінетика зневоднення зеленого горошку бланшованого та не бланшованого. Зневоднення відбувається за різних параметрів: температур, вологості та форм і розмірів самого горошку. Відзначено, що процес «з бланшуванням» відіграє суттєву роль у зниженні вмісту води за різних температур і діаметрів за менший час порівняно з «без бланшування». Енергія активації та коефіцієнт дифузії води, в статті [7] визначаються за допомогою законів Фіка. Доведено, що процес зневоднення бланшованого горошку є енергоощадним процесом.

На основі отриманої моделі в статті [8] показано, що зростання коефіцієнту дифузії води та початкова концентрація води в плодах і зменшення геометричних розмірів зразків мають прямий вплив на швидкість зневоднення, а також зворотний вплив на тривалість зневоднення. Використана в статті [8] модель є корисним інструментом для прогнозування кінетики зневоднення фруктів та для оптимізації процесу в цілому.

Як бачимо, з вище наведеної літератури, значна увага приділяється процесам дегідратації та зневоднення рослинної сировини. В той самий час, як процесам насичення, які відбуваються за аналогічним механізмом та залежать від тих самих параметрів, приділено недостатньо уваги. З аналізу досліджень і публікацій, авторами статті зроблено висновок, що коефіцієнт дифузії та початкова концентрація цукрози у розчині мають прямий вплив на швидкість насичення. Також на коефіцієнт ефективної дифузії будуть впливати геометричні параметри плодів, їх внутрішня структура, температура насичення. За допомогою розроблених моделей можна прогнозувати кінетику насичення цукрозою фруктів та овочів та перевірити їх відповідність шляхом узагальнення експериментальних даних, а також створювати оптимальні умови для процесу насичення цукрозою частинок рослинної сировини.

Формулювання мети статті. Дослідження дифузійних процесів насичення частинок бланшованого кореня моркви, визначення ефективних коефіцієнтів дифузії через поверхню та в середині частинки, визначення енергії активації процесу насичення та встановлення аналітичних залежностей для розрахунку зміни концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є частинки циліндричної форми кореня молодшої моркви. Для визначення поверхні масоперенесення (m , $\text{мкм}^2/\text{мкм}^2$) частинки кореня моркви аналізували за допомогою мікроскопа. Для цього відбиралися окремо зразки сирого кореня та бланшованої частинки кореня моркви.

Методика, за допомогою якої препарувалися та аналізувалися зразки, описана в [9, 10]. Згідно такої методики, авторами статті визначено середнє значення ширини пор між клітинами моркви, загальну довжину каналів між клітинами та середню площу поперечного перерізу клітини моркви, а також розраховано середню площу пор між клітинами. Загальну площу фрагменту клітини вимірюють за допомогою даної програми AIS [9, 10]. Фотофіксація здійснюється цифровою камерою.

Для визначення зміни концентрації частинок кореня моркви в часі під час насичення цукрозою з її розчину, експеримент проводили наступним чином. Готували розчин цукрози концентрацією 65 % (мас). Готували циліндричні частинки кореня моркви ($d=12\text{мм}$, $h=4\text{мм}$) і завантажували в розчин. Відношення маси частинок до маси розчину становило 1:5, концентрація цукрового розчину змінювалася незначно. Кожні 10 хв. відбирали проби частинок кореня моркви.

Дослідження проводили за умов температур 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C. Вміст цукрози в частинках моркви визначали рефрактометричним методом [9, 11].

Виклад результатів та їх аналіз. Загальний вигляд клітин сирої та бланшованої моркви (збільшення в 400 разів, окуляр 10) наведено на рис. 1а та 1б відповідно. Клітини сирої моркви майже прямокутні, пори чітко виражені. Після бланшування, клітини моркви майже круглі, а пори значно ширші, що сприятиме кращій дифузії молекул цукрози до середини частинки моркви.

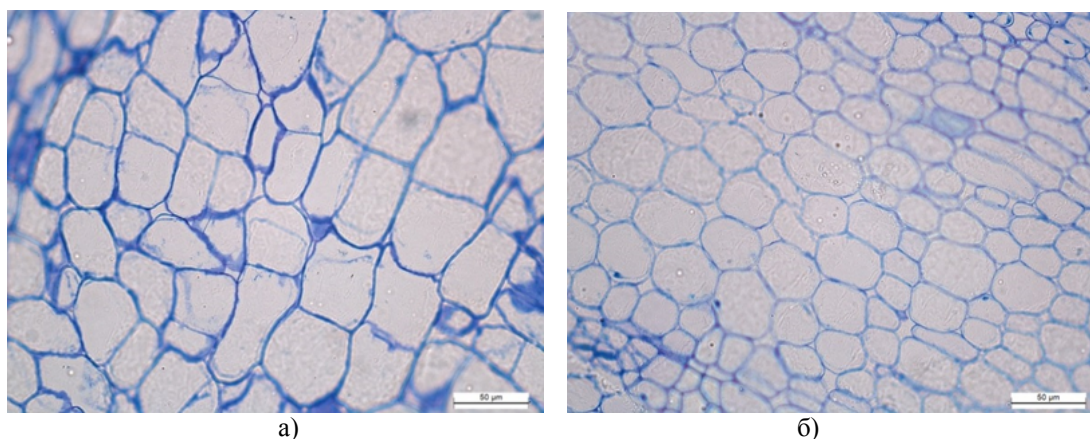
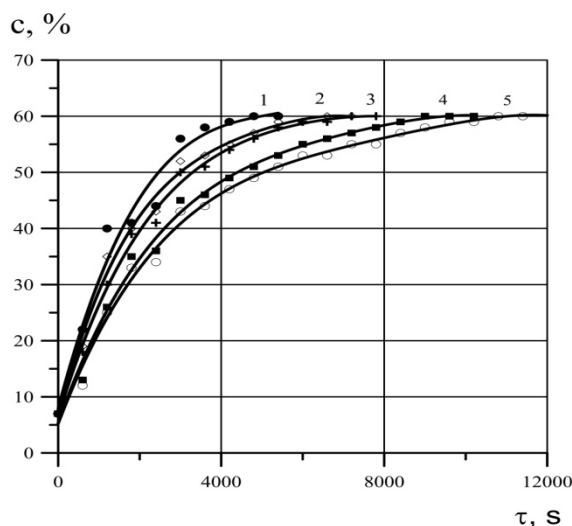


Рис. 1 – Фотографії клітини кореня моркви а) сирої; б) бланшованої

За зображенням бланшованої моркви (рис. 1б) визначено середній діаметр пор між клітинами моркви ($D_{\text{сер}} = 3\text{ мкм}$), загальну довжину каналів між клітинами ($L = 19,74\text{ мкм}$) та середню площу поперечного перерізу клітини моркви ($S_{\text{заг}} = 620\text{ мкм}^2$), а також розраховано середню площу пор між клітинами: $S_{\text{пустот}} = \pi \cdot D_{\text{сер}} \cdot L = 186\text{ мкм}^2$. Отримані числові значення дають змогу поррахувати пористість поверхні масоперенесення для бланшованої моркви: $m = S_{\text{пустот}}/S_{\text{заг}} = 0,3\text{ мкм}^2/\text{мкм}^2$.

На рис. 2 зображено зміну концентрації частинок кореня моркви в часі під час насичення його цукрозою. Як видно з рис.2, температура водного розчину цукрози значно впливає на час насичення цукром кореня моркви. Так, час насичення частинок за температури 50°C становить 10800 с, а насичення частинок за температури 90°C становить 4800 с. Тобто зростання температури від 50°C до 90°C зменшує час насичення більше, ніж в 2 рази.



1 – кінетична крива насичення за температури 90 °С; 2 – кінетична крива насичення за температури 80 °С; 3 – кінетична крива насичення за температури 70 °С;

4 – кінетична крива насичення за температури 60 °С; 5 – кінетична крива насичення за температури 50 °С

Рис. 2 – Залежність зміни концентрації цукрози в частинках кореня моркви в часі

Проведемо узагальнення результатів експерименту, зображеного у вигляді кінетичних кривих на рис. 2, використовуючи перший закон Фіка [11]:

$$dM = -D \cdot dF \cdot \frac{dc}{dn} \quad (1)$$

Запишемо рівняння (1) для розрахунку кількості поглинутої речовини в умовах проведеного експерименту:

$$M = D \cdot F \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (2)$$

Під час насичення цукрозою частинок кореня моркви, відбувається одночасно дифузія цукрози крізь зовнішню поверхню частинки та в середині частинки. Однакова кількість речовини проходить через поверхню частинки та в середині частинки. Використовуючи експериментальні дані, за рівнянням (2), розрахуємо коефіцієнт ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню частинки:

$$D = \frac{M}{F} \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (3)$$

та коефіцієнт ефективної дифузії в середині частинки кореня:

$$D_m = \frac{m \cdot M}{F} \cdot \frac{c^* - c_0}{r} \quad (4)$$

D – коефіцієнт ефективної дифузії через поверхню частинки, м²/с

D_m – коефіцієнт ефективної дифузії в середині частинки, м²/с;

M – кількість сиропу, що продифундувала з розчину цукрози в середину бланшованого кореня моркви, м³/с;

F – загальна зовнішня поверхня частинки кореня моркви, м²;

m – пористість поверхні масоперенесення (м²/м²);

r – еквівалентний радіус частинки кореня моркви, м;

c – поточна концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка);

c* – рівноважна концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка);

c₀ – початкова концентрація цукрози в частинці кореня моркви, (об'ємна частка).

Коефіцієнт ефективної дифузії, як через границю розділу фаз, так і в середині частинки значно залежать від температури. Залежність коефіцієнтів дифузії від температури описується рівнянням Ареніуса, модифікованого для масообмінних процесів [2]:

$$D = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (5)$$

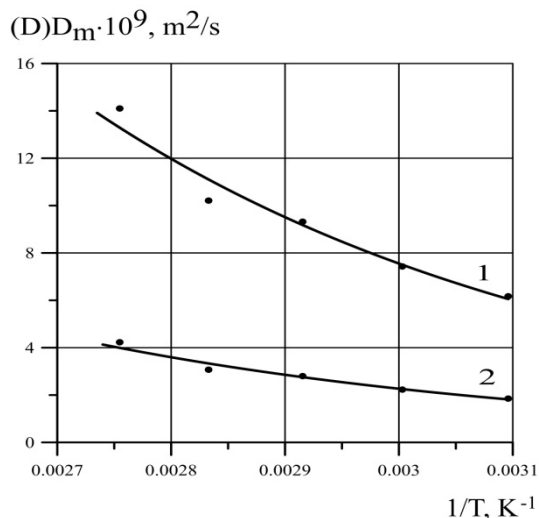
A – передекспоненційний множник;

E_a – енергія активації процесу насичення цукрозою частинок кореня моркви, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, Дж/моль·К;

T – температура насичення, К

Рівняння (5) дає змогу розрахувати енергію активації, за відомими значеннями температур та розрахованими, за рівнянням (3) значеннями коефіцієнтів ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз і, розрахованими, за рівнянням (4) значеннями коефіцієнтів ефективної дифузії (D_m) в середині частинки. Узагальнення експериментальних даних на основі рівняння (5) наведені на рис. 3.



1 – коефіцієнти ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз; 2 – коефіцієнти ефективної дифузії (D_m) в середині частинки

Рис. 3 – Криві залежності коефіцієнтів ефективної дифузії від температури

Як видно з кривих 1, 2 (рис. 3) дифузія на поверхні частинки відбувається в рази інтенсивніше, ніж в середині, де дифузійний процес, в основному, відбувається в каналах, між клітинами.

Експериментально визначені значення коефіцієнтів ефективної дифузії (D) через границю розділу фаз можна узагальнити експоненційною залежністю (рис. 3, крива 1), а також визначити енергію активації за рівнянням:

$$D = 7,62 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{2305,49}{T}} = 7,62 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{19158,62}{RT}} \quad (6)$$

Аналогічно, значення коефіцієнтів ефективної дифузії (D_m) в середині частинки узагальнюються експоненційною залежністю (рис. 3, крива 2) та визначається енергія активації за рівнянням (7):

$$D_m = 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{2305,49}{T}} = 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{19158,62}{RT}} \quad (7)$$

З рівнянь (6, 7) видно, що енергія активації приймає значення $E_a = 19,159$ кДж/моль та не залежить від температури (в діапазоні $50 - 90^\circ\text{C}$), від внутрішньої структури бланшованої частинки кореня моркви, а визначає енергію, необхідну для початку масообмінного процесу насичення цукрозою частинок моркви. Енергія активації, яка вказує на мінімальну енергію для початку процесу дифузії, визначається самою природою масообмінного процесу та властивостями речовин, що приймають в ньому участь.

Розглянемо механізм дифузійного перенесення цукрози з розчину великого об'єму у тверду частинку. Такі умови відповідають умовам експерименту, результати якого наведені на рис. 2. Бланшована частинка кореня моркви являє собою пористе тіло із значною внутрішньою поверхнею. Для створення математичної моделі, приймаємо, що всі канали між клітинами є кінетично рівноцінними, а тверде тіло є ізотропним у дифузійному відношенні. Крім того, приймаємо, що дифузійний процес відбувається по каналах між клітинами. Таке припущення цілком можливе, тому що канали між зруйнованими (бланшованими) клітинами максимально насичуються цукрозою.

З великого об'єму нерухомого розчину цукроза дифундує шляхом самодифузії до поверхні частинки, яка має циліндричну форму. На поверхні частинки виникає градієнт концентрації, за рахунок якого швидкість дифузії і, відповідно коефіцієнт ефективної дифузії крізь зовнішню поверхню буде зростати, порівняно зі швидкістю самодифузії у розчині. Завдяки концентраційному градієнту цукроза дифундує через поверхню в середину частинки, де, протягом певного часу (від 0 до $\tau \rightarrow \infty$) проходить шлях r . Такий механізм зображений на рис. 4. В середині частинки швидкість і ефективний коефіцієнт дифузії зменшуються, порівняно з дифузією навколо частинки, тому що внутрішня поверхня частинки є більша, ніж зовнішня. Цей факт підтверджують експериментальні дані, зображені на рис. 3.

Складність математичного опису такого механізму полягає в тому, що кожна бланшована частинка має надзвичайно складну внутрішню структуру, що значно ускладнює аналітичний розв'язок, тому скористаємося наближеним методом з використанням інтегральних рівнянь, адекватність яких перевіримо експериментально.

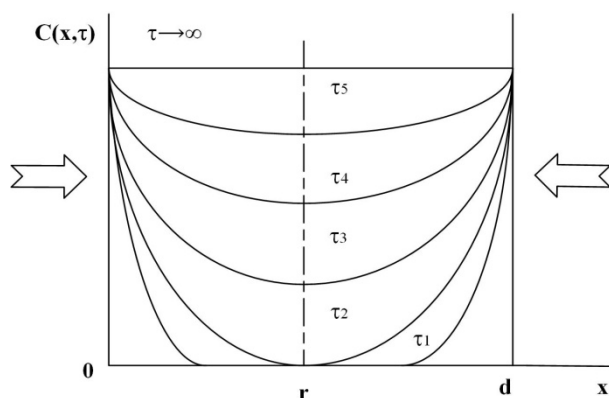


Рис. 4 – Дифузія з великого об'єму водного розчину цукрози в частинку бланшованого кореня моркви

З рис. 4., встановимо: початкові умови $c(x, 0)$ та граничні умови $c(0, \tau) = c(d, \tau) = c^*$

Зміна розподілу концентрації цукрози в середині частинки циліндричної форми описується рівнянням [11]:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \cdot e^{-\mu_n^2 \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (8)$$

При розкладанні кореня характеристичного рівняння, отримаємо рішення для розподілу концентрацій в часі [11].

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = A \cdot e^{-s \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (9)$$

A, s – коефіцієнти, знайдені експериментальним шляхом [9 – 11].

Для перевірки обраної математичної моделі (рівняння 8, 9) на адекватність, представимо результати експерименту у вигляді залежності:

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

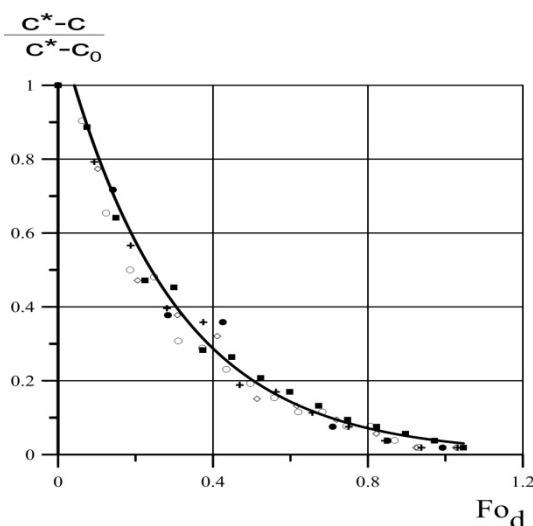


Рис. 5 – Крива узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі за температур (50 – 90°C)

Як видно, з рис. 5, усі експериментальні дані можна апроксимувати однією експоненційною залежністю, яка має вигляд:

$$\frac{c^* - c}{c^* - c_0} = 1,16 \cdot e^{-3,482 \cdot Fo_d} \quad (10)$$

Із залежності (10) видно, що предекспоненційний множник, який залежить від форми частинки дорівнює 1,16. Для частинок циліндричної форми, такий предекспоненційний множник, як стверджують автори [9 – 11] може бути в межах 0,69 – 1,62. Другий коефіцієнт, який залежить від температури та в'язкості роз-

чину, в залежності (10) приймає значення 3,482 та є однаковим для температур в межах 50 – 90°C, що є цілком достовірним, бо з ростом температури розчину, його в'язкість зменшується.

Залежність (10) дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в часі в частинці бланшованого кореня моркви циліндричної форми діаметром $d=12\text{ мм}$ та висотою $h=4\text{ мм}$ в межах температур 50 – 90°C. Отримана залежність (10) добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень, а середнє квадратичне відхилення приблизно становить 3%.

Висновки. За допомогою мікроскопа, фотофіксації та аналізу фотозразків, досліджено структуру клітин сирого та бланшованого кореня моркви. Доведено, що бланшований корінь моркви має більший діаметр каналів між клітинами, що сприяє кращій дифузії цукрози в середину частинки. Визначено пористість поверхні масоперенесення для бланшованої моркви, яка дозволяє розрахувати ефективний коефіцієнт дифузії в середині частинки. Наведені результати експериментальних досліджень зміни концентрації частинки кореня моркви в часі під час насичення його цукрозою за температур 50 – 90°C. На основі отриманих даних експерименту та першого закону Фіка, розраховані коефіцієнти ефективної дифузії через поверхню частинки та коефіцієнти ефективної дифузії в середині частинки. Визначено енергію активації процесу насичення $E_a = 19,159\text{ кДж/моль}$, доведено її незалежність від температури та внутрішньої структури за даних умов. Проведено узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі за температур 50 – 90°C. Виведена залежність (10), яка дозволяє розрахувати зміну концентрації цукрози в бланшованому корені моркви в часі.

References

1. Gleyce K. I. Pinheiro, Daniel E. C. de Oliveira, Weder N. Ferreira Junior, Osvaldo Resende. (2019). Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) epicarp. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental – Agriambi*, 24(2), 121 – 127. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p121-127>
2. M. E. Rezagah, M. Kashaninejad, H. Mirzaei and M. Khomeiri. (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>
3. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, Osvaldo Resende, Jaqueline Ferreira Vieira Bessa, Adrieli Nagila Kester. (2013). Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(2), 43 – 46. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.308>
4. Ana P. P. Jorge, Weder N. Ferreira Junior, Lígia C. de M. Silva, Daniel E. C. de Oliveira, Osvaldo Resende. (2020). Drying kinetics of 'guero' (*Syagrus oleracea*) fruit pulp. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental – agriambi*, 25(1), 23 – 29. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p23-29>
5. André Luís Duarte Goneli, Maria do Carmo Vieira, Henrique da Cruz Benitez Vilhasanti, Alexandre Alves Gonçalves. (2014). Mathematical modeling and effective diffusion of *Schinus terebinthifolius* leaves during drying. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 56 – 64. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100005>
6. Nada S. Al-Kadhi. (2019). The kinetic and thermodynamic study of the adsorption Lissamine Green B dye by micro-particle of wild plants from aqueous solutions. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(3), 231 – 238. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.05.004>
7. Mohammad Sirousazar. (2017). Approximate Mathematical Modeling of Osmotic Dehydration of Cone-Shaped Fruits and Vegetables in Hypertonic Solutions. *Turkish Journal of Agriculture -Food Science and Technology*, 5(6), 581-585. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i6.581-585.821>
8. Om Prakash Pandey, Bimal Kumar Mishra, Ashok Misra. (2019). Comparative study of green peas using with blanching & without blanching techniques. *Information Processing In Agriculture*, 6(2), 285 – 296. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.10.002>
9. Huzova I. (2022). Doslidzhennja dyfuzii' cukrozy v plodah jabluka u vyrobnyctvi jabluchnyh cukativ. *Scientific works*, 86(1), 23–30. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2398>
10. 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.v11i4.72
11. Huzova I. et al. (2021). [Study of diffusion processes in carrot particles](#). Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv, 70–71. doi.org/10.23939/cte

STUDY OF DIFFUSION PROCESSES OF SUCROSE SATURATION OF CARROT ROOT PARTICLES

Huzova I., PhD of Technical Sciences, Associate Professor
Atamanyuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. Diffusion processes in the food industry occur during the production of candied fruits and play a key role in such productions. Establishing the mechanism of diffusion processes and reducing the saturation time is an urgent issue.

Diffusion processes of sucrose saturation of carrot root particles are investigated in the article. Photographs of raw and blanched carrot cells were analyzed. The average diameter of pores between carrot cells, the total length of channels between cells and the average cross-sectional area of a carrot cell were determined, and the average area of voids between cells was calculated. The obtained numerical values make it possible to calculate the porosity of the mass transfer surface for blanched carrots.

The change in the concentration of carrot root particles over time during its saturation with sucrose was analyzed. It has been proven that the temperature of the aqueous sucrose solution significantly affects the time of sugar saturation of the carrot root. An increase in temperature from 50°C to 90°C reduces the saturation time by more than 2 times.

Based on the results of the experiment, the effective diffusion coefficients through the outer surface of the particle and the effective diffusion coefficients in the middle of the carrot root particle were calculated. The value of the activation energy was calculated in the article: $E_a = 19.159 \text{ kJ/mol}$. The activation energy does not depend on the temperature, on the internal structure of the blanched carrot root particle. The activation energy determines the energy required to start the mass exchange process of saturation of carrot particles with sucrose.

The mechanism of diffusion transfer of sucrose from a large volume solution to a solid carrot particle is substantiated. An analytical solution of the equations was established to determine the change in the concentration of sucrose in carrot particles over time. The adequacy of the derived equations was verified experimentally. The derived analytical dependence is necessary for: calculating the change in sucrose concentration over time in a particle of blanched carrot root of cylindrical shape with a diameter of $d=12\text{mm}$ and a height of $h=\text{mm}$ within the temperature range of 50-90°C.

Key words: carrot root particle, effective diffusion coefficient, activation energy

Список використаної літератури

1. Gleyce K. I. Pinheiro, Daniel E. C. de Oliveira, Weder N. Ferreira Junior, Osvaldo Resende. Drying kinetics of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) epicarp // Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental - Agriambi. 2019. 24(2). P. 121 – 127
2. M. E. Rezagah, M. Kashaninejad, H. Mirzaei and M. Khomeiri. Osmotic dehydration of button mushroom: Fickian diffusion in slab configuration // Latin American applied research. 2010. 40(1), P. 23–26.
3. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, Osvaldo Resende, Jaqueline Ferreira Vieira Bessa, Adrieli Nagila Kester. Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process // Journal of Agricultural Engineering. 2013. 44(2). P. 43 – 46
4. Ana P. P. Jorge, Weder N. Ferreira Junior, Lígia C. de M. Silva, Daniel E. C. de Oliveira, Osvaldo Resende. Drying kinetics of ‘gueroba’ (*Syagrus oleracea*) fruit pulp // Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental – agriambi. 2020. 25(1). P. 23 – 29.
5. André Luís Duarte Goneli, Maria do Carmo Vieira, Henrique da Cruz Benitez Vilhasanti, Alexandre Alves Gonçalves. Mathematical modeling and effective diffusion of *Schinus terebinthifolius* leaves during drying // Pesquisa Agropecuária Tropical. 2014. 44(1). P. 56 – 64
6. Nada S. Al-Kadhi. The kinetic and thermodynamic study of the adsorption Lissamine Green B dye by micro-particle of wild plants from aqueous solutions // Egyptian Journal of Aquatic Research. 2019. 45(3) P. 231 – 238
7. Mohammad Sirousazar. Approximate Mathematical Modeling of Osmotic Dehydration of Cone-Shaped Fruits and Vegetables in Hypertonic Solutions // Turkish Journal of Agriculture -Food Science and Technology. 2017. 5(6). P. 581-585.
8. Om Prakash Pandey, Bimal Kumar Mishra, Ashok Misra. Comparative study of green peas using with blanching & without blanching techniques // Information Processing In Agriculture. 2019. 6(2). P. 285 – 296.
9. Гузьова І. О. Дослідження дифузії цукрози в плодах яблука у виробництві яблучних цукатів // Наукові праці. 2022. 86(1). С. 23–30.
10. 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.
11. [Study of diffusion processes in carrot particles](#). Huzova I. et al. // Chemical technology and engineering proceedings of the 3rd International scientific conference. Lviv, 2021. P. 70–71.

Отримано в редакцію 05.07.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 05.07.2023
Approved 26.09.2023