

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЇ ЦУКРОЗИ В ПЛОДАХ ЯБЛУКА У ВИРОБНИЦТВІ ЯБЛУЧНИХ ЦУКАТІВ

Гузьова І.О., к.т.н., доцент
НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Анотація. Стаття присвячена удосконаленню процесу виробництва цукатів. Дослідження внутрішньодифузійних процесів є першочерговим завданням з точки зору енергозбереження процесу та дотримання високої якості готових продуктів. Процес виробництва цукатів треба організувати таким чином, щоб насичення плодів цукром відбувалося швидше за оптимально підібраних температур насичення та концентрації сиропу.

В статті досліджуються процеси насичення цукром плодів яблука. Обґрунтовано необхідність визначення коефіцієнтів молекулярної дифузії та коефіцієнтів масопровідності. Доведено, що коефіцієнт масопровідності залежить від внутрішньої структури плодів. Проведено аналіз фотографій клітин сирих та бланшованих плодів яблука. Визначено пористість плодів. Виведено залежності: для розрахунку коефіцієнту молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води, для розрахунку коефіцієнту масопровідності в бланшованих плодах яблука, для розрахунку коефіцієнту масопровідності в сирих плодах яблука. Залежності дозволяють аналітично розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» в межах температур 30 – 100 °С. Коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука в 5 разів більший, ніж в сирих плодах яблука.

В статті встановлені експериментальні та теоретичні залежності для розрахунку зміни концентрації цукру в часі в плодах яблука. Обґрунтована залежність зміни концентрації цукру в яблучних цукатах в часі та вплив на неї температури сиропу. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. У виведених залежностях передекспоненційний множник є однаковий та приблизно дорівнює одиниці. Це підтверджує той факт, що цей коефіцієнт, знайдений експериментальним шляхом, залежить від форми частинок. Показник степені в залежностях суттєво залежить від температури та в'язкості цукрового сиропу та може бути визначений виключно експериментальним шляхом.

Ключові слова: яблучні цукати, дифузійні процеси, коефіцієнт масопровідності, коефіцієнт дифузії

Формулювання проблеми. Виробництво цукатів являє собою, в першу чергу, процес насичення фруктів, овочів та ягід цукровим сиропом. Цей процес є тривалим в часі та лімітується внутрішньою дифузією цукрози в плодах. Актуальним питанням є скорочення часу насичення плодів цукром з одночасним збереженням їх органолептичних властивостей. Тому, дослідження внутрішньодифузійних процесів є першочерговим завданням з точки зору енергозбереження процесу та дотримання високої якості готових продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження внутрішньодифузійних процесів розглядається в ряді робіт на прикладі сушіння [1] адсорбції [2, 3] та екстрагування [4 – 6]. Так, на прикладі сушіння, авторами [1] обґрунтована фізична суть ефективного коефіцієнта дифузії, яка полягає в тому, що на внутрішньодифузійні процеси під час сушіння має значний вплив температура теплового агенту. На прикладі екстрагування, авторами [4] обґрунтовується фізична суть еквівалентного коефіцієнта дифузії, бародифузії [5] та коефіцієнта масопровідності [6], на які суттєво впливають геометрія та внутрішня структура пористих тіл.

Дослідженню процесів дифузії в цукрових сиропях присвячений ряд робіт [7, 8]. Так, авторами [7] доведено, що підвищення температури значно прискорює дифузію. Це пояснюється тим, що при нагріванні збільшується швидкість руху дифундуючих частинок та падає в'язкість сиропу. На швидкість дифузії також впливає концентрація сиропу із збільшенням якої, дифузія збільшується. Проте, збільшення концентрації призводить до збільшення в'язкості сиропу, що сповільнює дифузію [8]. Саме тому, процес виробництва цукатів треба організувати таким чином, щоб насичення плодів цукром відбувалося швидше за оптимально підібраних температур насичення та концентрації сиропу. Правильно підібрані параметри насичення будуть визначатися природою та внутрішньою будовою плодів.

Формулювання мети статті. Метою даної статті є дослідження масообмінних процесів під час насичення яблучних плодів сиропом, встановлення аналітичних залежностей для визначення коефіцієнтів масопровідності в плодах яблука, а також встановлення експериментальних та теоретичних залежностей для розрахунку зміни концентрації цукру в часі в плодах яблука.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є плоди яблука сорту «Семеренко». Для експериментального визначення коефіцієнта молекулярної дифузії плоди яблука піддавали аналізу на електронному мікроскопі. На мікроскопі розглядалися зразки сирого та бланшованого 10 хв в киплячій воді плоду яблука.

Зразки препарували, згідно методики, описаній в [9, 10]. 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]. Це програма дозволяє визначити середній діаметр клітин та міжклітинного простору, а також загальну довжину каналів між клітинами на певній площі фрагменту клітини.

Для визначення зміни концентрації плодів яблука в часі під час насичення цукром з сиропу, експеримент проводили наступним чином. Готували сироп концентрацією 70 % (мас). Готували кубики плодів яблука 15x15x15 мм і завантажили в сироп. Обраний розмір плодів обумовлений споживними властивостями готових цукатів, зокрема їх приємним смаком, добрим засвоєнням, стійкістю під час зберігання, універсальністю використання як для безпосереднього споживання, так і для виготовлення більшості кондитерських виробів. Відношення маси плодів до маси сиропу становила 1:5. Таким чином концентрація сиропу змінювалася незначно. Кожні 5 хв. відбирали проби частинок плодів яблука.

Дослідження проводили за умов температур 30 °C, 50 °C, 70 °C, 100 °C. Вміст цукру в плодах визначали за допомогою рефрактометра HT118 (0 – 80 % Brix). Для цього розрізали досліджуваній плід на дві однакові частини і вичавлювали краплину соку з середньої частини плоду на поверхню призми рефрактометра.

Виклад результатів та їх аналіз. Фотографії зразків (збільшення в 200 разів, окуляр 10) сирого та бланшованого яблука наведені на рис. 1. Як видно з рис. 1а, клітини сирого яблука є різної форми та розміру, канали між клітинами чітко виражені. З рис. 1б видно, що клітини бланшованого яблука є деформовані, а каналів між клітинами є набагато більше.

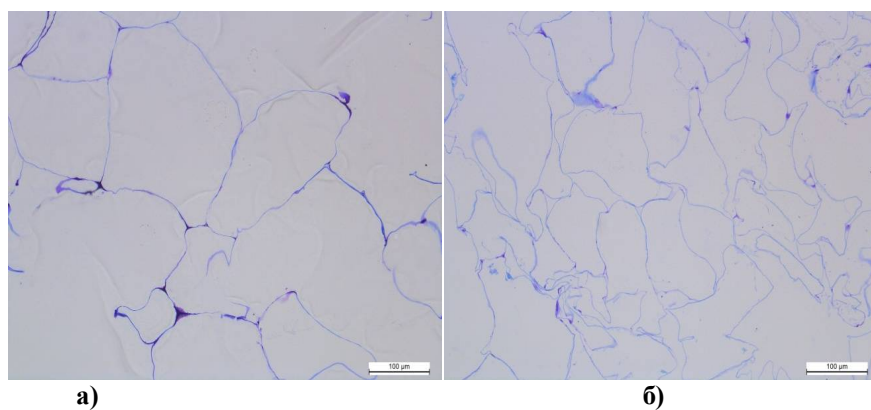


Рис. 1 – Фотографії клітини плоду яблука а) сирого; б) бланшованого

Для визначення коефіцієнта молекулярної дифузії в міжклітинному просторі плодів яблука необхідно визначити пористість поверхні масоперенесення досліджуваного зразка. Пористість поверхні масоперенесення (m , m^2/m^2) визначається, як відношення загальної площі поверхні каналів між клітинами ($S_{\text{пустот}}$, m^2) до загальної площі клітини ($S_{\text{заг}}$, m^2). Для визначення пористості проаналізуємо фотографії клітин на іншому збільшенні.

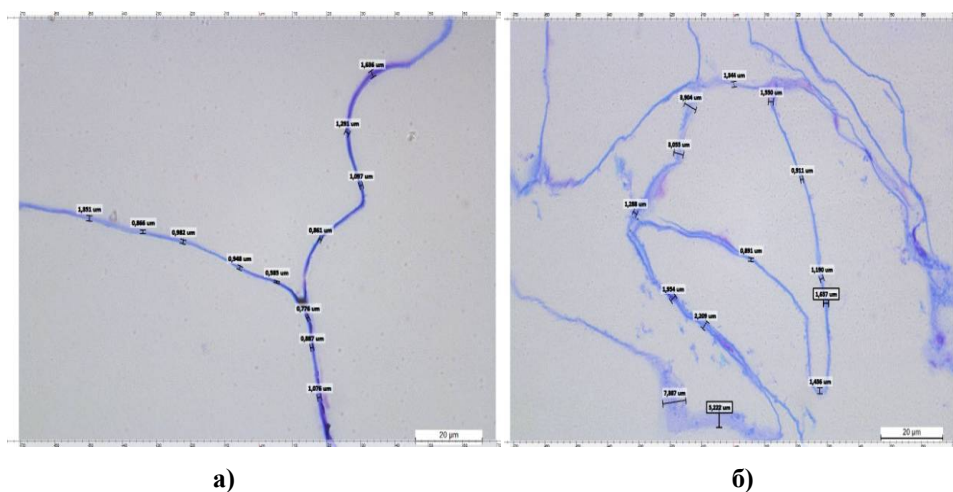


Рис. 2 – Фотографії клітини плоду яблука із визначенням середнього діаметра каналів між клітинами а) сирого; б) бланшованого

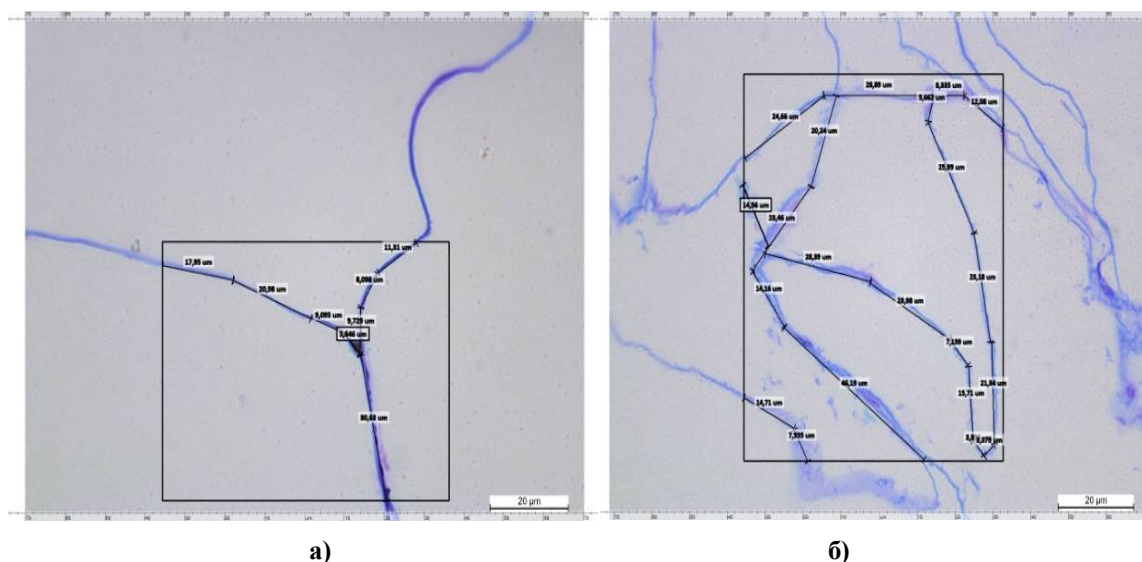


Рис. 3 – Фотографії клітини плоду яблука із визначенням довжини каналів між клітинами
а) сирого; б) бланшованого

Фотографії зразків (збільшення в 1000 разів, окуляр 10) сирого яблука наведені на рис. 2а, 3а. З рис. 2а було визначено діаметр каналів між клітинами (d_i , мкм, 12 вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами сирого яблука ($D_{сеп}$, мкм). З рис. 3а визначалися довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 8 вимірів) та загальна довжина каналів між клітинами сирого яблука (L , мкм). Результати вимірювання та розрахунки наведені в табл. 1.

Фотографії зразків (збільшення в 1000 разів, окуляр 10) бланшованого яблука наведені на рис. 2б, 3б. Аналогічно до попереднього варіанту, з рис. 2б було визначено діаметр каналів між клітинами (d_i , мкм, 14 вимірів) та середній діаметр каналів між клітинами бланшованого яблука ($D_{сеп}$, мкм). З рис. 3б визначалися довжини каналів між клітинами (l_i , мкм, 21 вимір) та визначалася загальна довжина каналів між клітинами бланшованого яблука (L , мкм). Результати вимірювання та розрахунки наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Сире яблуко

$i =$	d_i , мкм	$i =$	l_i , мкм	S , мкм ²
1	1.64	–	250.93	$S_{заг} = 3848.92$
2	1.29	1	11.31	
3	1.1	2	8.1	
4	0.86	3	9.73	
5	0.87	4	30.63	
6	0.98	5	17.95	
7	0.95	6	20.98	
8	0.78	7	9.09	
9	0.89	8	5.65	
10	1.08		$L = \sum_{i=1}^{n=8} l_i = 113,44$	$S_{нустот} = \pi \cdot D_{сеп} \cdot L = 367,48$
11	1.35			
12	0.59			
	$D_{сеп} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=12} d_i = 1,032$			
	$S_{сеп} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{сеп}^2 = 0,835$			

Таблиця 2

Бланшоване яблуко				
i =	d _i , мкм	i =	l _i , мкм	S, мкм ²
1	1.34	–	299.96	S _{заг} = 5581.92
2	1.55	1	24.66	
3	1.95	2	28.89	
4	2.21	3	8.34	
5	1.44	4	12.08	
6	0.89	5	20.24	
7	1.19	6	23.46	
8	1.29	7	14.16	
9	3.9	8	46.19	
10	3.06	9	28.39	
11	0.91	10	23.98	
12	1.66	11	7.16	
13	7.39	12	15.71	
14	5.22	13	3.86	
	$D_{сер} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=14} d_i = 2,43$	14	3.38	
	$S_{сер} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{сер}^2 = 4,63$	15	21.34	
		16	23.18	
		17	25.99	
		18	5.66	
		19	14.71	
		20	7.55	
		21	14.56	
			$L = \sum_{i=1}^{n=21} l_i = 373,49$	$S_{пустот} = \pi \cdot D_{сер} \cdot L = 2848,13$

Отже, за результатами вимірювання та розрахунків, які наведені на рис. 2, 3 та в табл. 1, 2. було визначено пористість поверхні масоперенесення плодів сирого яблука $m = S_{пустот} / S_{заг} = 0,095 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ та бланшованого яблука $m = S_{пустот} / S_{заг} = 0,51 \text{ м}^2 / \text{м}^2$. З результатів розрахунків видно, що пористість поверхні масоперенесення бланшованого яблука більша приблизно в 5 разів за пористість поверхні масоперенесення сирого яблука. Саме тому, для виробництва цукатів рекомендують використовувати бланшовані плоди.

Розрахуємо коефіцієнт дифузії молекул цукрози в суцільному рідкому середовищі – воді за відомим рівнянням Енштейна [9]:

$$D_c = \frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r} \quad (1)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К

T – абсолютна температура, К

r – радіус дифундуючих частинок, м

μ – в'язкість рідкого середовища, Па·с

Як бачимо з рівняння (1) коефіцієнт молекулярної дифузії є прямопропорційний температурі середовища та зворотньопропорційний його в'язкості. Враховуючи те, що в середовищі сиропу знаходяться плоди яблука, в які дифундують молекули цукрози, необхідно розрахувати коефіцієнт масопровідності D_m , який присутній в пористому тілі яблука. Коефіцієнт масопровідності D_m є прямопропорційним коефіцієнту дифузії та залежить від структурних факторів: пористості, геометрії капілярів, співвідношенню між розмірами молекул речовини і радіуса капіляра. Тобто, коефіцієнт масопровідності D_m буде також прямопропорційний пористості плодів яблука (m), яка була розрахована вище та, відповідно, буде визначатися згідно залежності (2):

$$D_m = m \cdot D_c \quad (2)$$

На рис. 4 наведена залежність від температури коефіцієнта молекулярної дифузії цукрози у воді D_c , розрахованого за рівнянням (1) та коефіцієнта масопровідності D_m цукрози в плодах сирого та бланшованого яблука, визначеного з рівняння (2). Отримані точки апроксимували експоненціальною залежністю.

Апроксимація проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10. В результаті ап-

роксимації одержані рівняння:

для розрахунку коефіцієнту молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води:

$$D_c = 4.1 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (3)$$

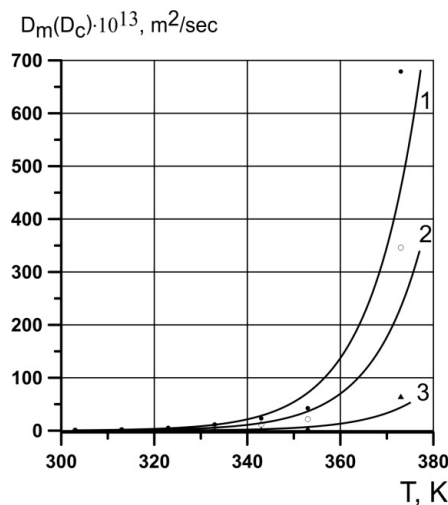
для розрахунку коефіцієнту масопровідності в бланшованих плодах яблука:

$$D_m = 2.1 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (4)$$

для розрахунку коефіцієнту масопровідності в сирих плодах яблука:

$$D_m = 0.4 \cdot 10^{-26} \cdot e^{0.0929 \cdot T} \quad (5)$$

З рис. 4 видно, що найбільш суттєвий вплив на коефіцієнти дифузії та масопровідності мають внутрішня структура плодів та температура середовища. З ростом температури коефіцієнти суттєво зростають. Так, наприклад, з ростом температури від 30 до 50 °С коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука зростає в 9 разів. Від 50 до 70 °С – зростає незначно (в 4 рази), а від 70 до 100 °С зростає майже в 30 разів. Саме тому, процес виробництва цукатів в цукровому сиропі можна рекомендувати проводити за умов температур більше 80 °С, бажано не доводячи сироп до кипіння, щоб не було суттєвого випаровування води з сиропу.



1 – в суцільному середовищі (D_c); 2 – в бланшованих плодах яблука (D_m);
3 – в сирих плодах яблука (D_m)

Рис. 4 – Залежність коефіцієнту молекулярної дифузії (D_c) та масопровідності (D_m) молекул цукрози від температури середовища

З рівнянь (4 – 5) та рис. 4 видно, що предекспоненційний множник залежить від внутрішньої структури плодів. Коефіцієнт масопровідності в бланшованих плодах яблука в 5 разів більший, ніж в сирих плодах яблука, що видно з рівнянь 4 – 5.

Залежності (3 – 5) дозволяють аналітично розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» в межах температур 30 – 100 °С. Отримані залежності (3 – 5) добре узгоджуються з експериментально визначеними коефіцієнтами, а максимальна відносна похибка в результаті апроксимації експоненціальною залежністю не перевищує 3 %.

На час насичення плодів яблука цукром буде впливати як коефіцієнт масопровідності так і форма та розміри частинок пористого тіла.

Кінетику дифузійних процесів описує закон Фіка [9, 10]:

$$\frac{\partial c_2}{\partial \tau} = D_m \cdot \left(\frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Приєднаємо до диференційного рівняння (6) крайові умови:

$$\tau=0; c_2=c_0 = \text{const}$$

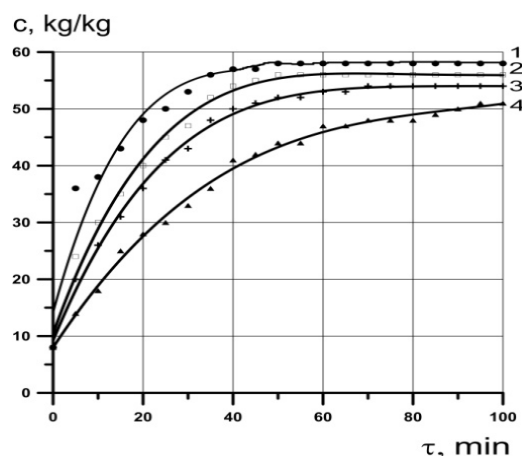
$$c_{2\Pi}=0.$$

Тоді результатом розв'язку рівняння (6) в загальному вигляді буде рівняння (7):

$$1 - \frac{c}{c_p} = A \cdot e^{-s \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (7)$$

де R – характерний розмір;
 c_2 – біжуча концентрація
 A, s – коефіцієнти, знайдені експериментальним шляхом [11].

Залежність зміни концентрації цукрози в цукатах в часі за температур 30 °C; 50 °C; 70 °C; 100°C наведено на рис. 5.

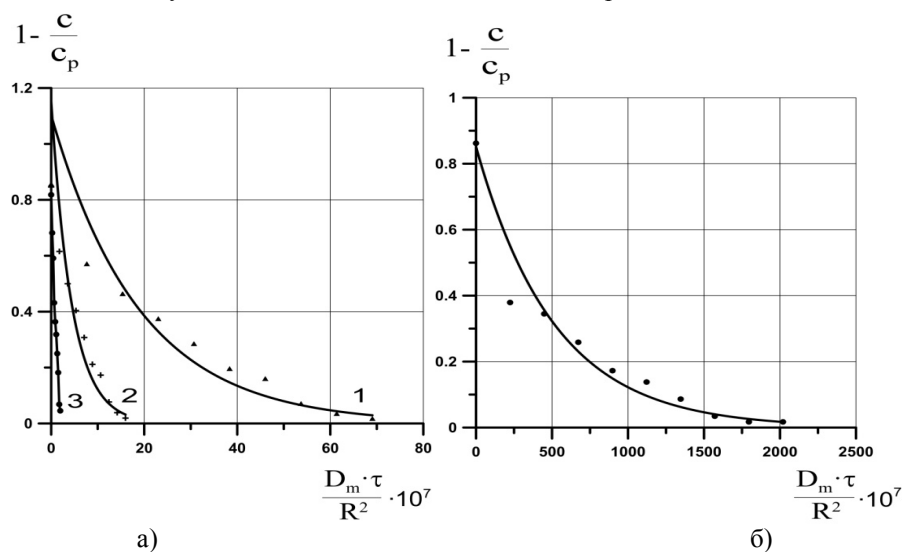


1 – кінетична крива насичення цукатів температурою 100 °C; 2 – кінетична крива насичення цукатів температурою 70 °C; 3 – кінетична крива насичення цукатів температурою 50 °C;
 4 – кінетична крива насичення цукатів температурою 30 °C

Рис. 5 – Залежність зміни концентрації цукрози в цукатах яблук в часі

З рис. 5, видно, що під час витримування яблучних цукатів у сиропі концентрація цукрози в цукатах зростає з ростом температури.

Використовуючи рівняння (7) проведемо узагальнення результатів досліджень насичення частинок яблука цукром. Побудувавши графіки залежності зміни концентрацій від безрозмірного часу (рис. 6), бачимо, що всі експериментальні точки узагальнюються експоненціальними кривими.



1 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 70 °C; 2 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 50 °C; 3 – узагальнююча крива насичення цукатів температурою 30 °C;
 узагальнююча крива насичення цукатів температурою 100 °C

Рис. 6 – Криві узагальнення експериментальних даних зміни концентрації цукрози в яблучних цукатах в часі за температур

В результаті апроксимації, що проводилась за допомогою графічно-програмного комплексу Grapher 10, отримані аналітичні експоненціальні залежності, які мають вигляд:

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 30 °C:

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-1.4 \cdot 10^7 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (8)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 50 °С:

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-2.2 \cdot 10^6 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (9)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 70 °С

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-5.25 \cdot 10^5 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (10)$$

залежність зміни концентрації яблучних цукатів в часі за температури 100 °С

$$1 - \frac{c}{c_p} = e^{-1.94 \cdot 10^4 \cdot \frac{D_m \cdot \tau}{R^2}} \quad (11)$$

Як видно з аналітичних залежностей (8 – 11), предекспоненційний множник є однаковий та приблизно дорівнює одиниці. Це підтверджує той факт, що цей коефіцієнт, знайдений експериментальним шляхом, залежить від форми частинок. Як стверджують автори [9] для кубічної та прямокутної форми цей коефіцієнт приблизно дорівнює 0,69 – 1. Показник степені в залежностях (8 – 11) суттєво залежить від температури та в'язкості цукрового сиропу. Так, наприклад, швидкість насичення яблучних цукатів цукром за умов 70 °С в 30 разів менша, ніж швидкість насичення за умов 100 °С. Таким чином, показник степені в залежностях (8 – 11) може бути визначений виключно експериментальним шляхом.

Залежності (8 – 11) дозволяють аналітично розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука сорту «Семеренко» кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. Отримані залежності (8 – 11) добре узгоджуються з експериментально визначеними коефіцієнтами, а максимальна відносна похибка в результаті апроксимації експоненціальною залежністю не перевищує 3 %.

Висновки. На основі аналізу будови клітин сирих та бланшованих плодів яблука сорту «Семеренко» визначено коефіцієнт масопровідності молекул цукрози в середині плодів. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати коефіцієнт молекулярної дифузії цукрози в суцільному середовищі води та коефіцієнти масопровідності в сирих та бланшованих плодах яблука в межах температур 30 – 100 °С.

На основі експериментальних досліджень обґрунтована залежність зміни концентрації цукру в яблучних цукатах в часі та вплив на неї температури сиропу. Виведені аналітичні залежності, які дають змогу розрахувати зміну концентрації цукру в часі в бланшованих плодах яблука кубічної форми розміром 15х15х15 мм в межах температур 30 – 100 °С. Обґрунтовані раціональні температурні режими насичення цукатів цукром.

References

1. Hosovsky, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*, 4(10(4)), 459 – 463. doi.org/10.23939/chcht10.04.459
2. Gumnitskii Ya., Lyuta O. (2014). Molecular Diffusion Mass Transfer of Substance in Soil Medium. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 48(4), 444–450. doi.org/10.1134/S0040579514040174
3. Petrushka I. M., Gumnitskii Ya. M., Malovanyi M. S. (2013). External Diffusion Kinetics of the Adsorption of Anionic Red 8C Dye on Glaucanite. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 47(2), 191–195. DOI: 10.1134/S004057951206019X
4. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Bandura, V., Mazurenko, I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11-101), 24–32. doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937
5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210–218. DOI: 10.3103/S1068375518020047
6. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11-88), 34–42. doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843
7. Burdo, O., Bezbakh, I., Zykov, A., ...Zhengzheng, S., Phylipova, L. (2021). Development of the Design and Determination of Mode Characteristics of Block Cryoconcentrators for Pomegranate Juice. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6–14. doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230182
8. Mikhailik, V.A., Dmitrenko, N.V., Snezhkin, Y.F. (2019). Investigation of the Influence of Hydration on the Heat of Evaporation of Water From Sucrose Solutions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92(4), 916–922. DOI: 10.1007/s10891-019-02003-8
9. 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
10. 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 SUCROSE DIFFUSION IN APPLE FRUITS IN THE PRODUCTION OF CANDIED APPLES

Huzova I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University

Abstract. The article is devoted to the improvement of the candied fruit production process. The study of intradiffusion processes is a priority task, it is necessary to save energy in the process and maintain the high quality of finished products. The process of production of candied fruit should be organized in such a way that the saturation of fruits with sugar occurs faster at optimally selected saturation temperatures and syrup concentration.

The article examines the processes of sugar saturation of apple fruits. The necessity of determining molecular diffusion coefficients and mass conductivity coefficients is substantiated. It has been proven that the coefficient of mass conductivity depends on the internal structure of the fruit. An analysis of photographs of raw and blanched apple fruit cells was carried out. The porosity of the fruits was determined. Dependencies are derived: for calculating the molecular diffusion coefficient of sucrose in a continuous medium of water, for calculating the coefficient of mass conductivity in blanched apple fruits, for calculating the coefficient of mass conductivity in raw apple fruits. Dependencies allow to analytically calculate the molecular diffusion coefficient of sucrose in a continuous medium of water and mass conductivity coefficients in raw and blanched apples «Semerenko» variety within the temperature range of 30-100 °C. The coefficient of mass conductivity in blanched apple fruits is 5 times higher than in raw apple fruits.

The article establishes experimental and theoretical dependencies for calculating changes in sugar concentration over time in apple fruits. Reasoned dependence of the change in sugar concentration in candied apples over time and the influence of syrup temperature on it. Analytical dependences have been derived that make it possible to calculate the change in sugar concentration over time in blanched cubic apple fruits with a size of 15x15x15 mm in the range of temperatures from 30 to 100 °C. In the derived dependencies, the pre-exponential factor is the same and approximately equal to unity. This confirms the fact that this coefficient, found experimentally, depends on the shape of the particles. The degree of dependence depends significantly on the temperature and viscosity of the sugar syrup and can be determined exclusively experimentally.

Keywords: candied apples, diffusion processes, mass conductivity coefficient, diffusion coefficient

Список використаної літератури

1. Hosovsky, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks // Chemistry & Chemical Technology. 2016. Vol. 4, No. 10(4). P. 459 – 463.
2. Gumnitskii Ya., Lyuta O. Molecular Diffusion Mass Transfer of Substance in Soil Medium // Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii. 2014. 48(4). P. 444–450.
3. Petrushka I. M., Gumnitskii Ya. M., Malovanyi M. S. External Diffusion Kinetics of the Adsorption of Anionic Red 8C Dye on Glauconite // Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii. 2013. 47(2). P. 191–195.
4. Burdo, O., Bezbah, I., Kepin, N., Bandura, V., Mazurenko, I. Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. 5(11-101). P. 24–32.
5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018. 54(2). P. 210–218.
6. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 4(11-88). P. 34–42.
7. Burdo, O., Bezbakh, I., Zykov, A., ...Zhengzheng, S., Phylipova, L. Development of the Design and Determination of Mode Characteristics of Block Cryoconcentrators for Pomegranate Juice // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 2. P. 6–14.
8. Mikhailik, V.A., Dmitrenko, N.V., Snezhkin, Y.F. Investigation of the Influence of Hydration on the Heat of Evaporation of Water From Sucrose Solutions // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. 92(4). P. 916–922.
9. 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.
10. [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 22.05.2022

Прийнято до друку 23.09.2022

Received 22.05.2022

Approved 23.09.2022