

П.П. Пивоваров, д-р техн. наук, проф.

В.О. Захаренко, канд. техн. наук, доц.

НОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ ПІД ЧАС ОБВОДНЕННЯ СУШЕНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Розглянуто новий метод визначення коефіцієнта дифузії під час обводнення сушеної моркви. Для знаходження коефіцієнта дифузії використовували явний вид диференціальної функції розподілу пор за радіусами (ДФР), який знаходили сорбційним методом з використанням аналітичного виразу для ізотерм сорбції-десорбції і ДФР. Використання ДФР і введення граничного радіуса для заповнених мікрокапілярів дозволило визначити середній вологовміст, тобто коефіцієнт дифузії сушеної сировини при відновленні.

Рассмотрен новый метод определения коэффициента диффузии при обводнении сушеной моркови. Для нахождения коэффициента диффузии использовали явный вид дифференциальной функции распределения пор за радиусами (ДФР), который находили сорбционным методом с использованием аналитического выражения для изотерм сорбции-десорбции и ДФР. Использование ДФР и введение граничного радиуса для заполненных микрокапилляров позволило определить среднее влагосодержание, то есть коэффициент диффузии сушеного сырья при восстановлении.

A new method of determining diffusion coefficient under condition of dried carrot hydration was considered. An evident kind of differential function of pores distribution along the radii (DFD) found by sorption method with the usage of analytical expression for isotherm of sorption-desorption and DFD was used for determining diffusion coefficient. Usage of DFD and introduction of boundary radius for filled microcapillaries allowed to determine average moisture content that is diffusion coefficient of dried raw material under rehydration.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Ефективність процесів виробництва сушених овочів є високою, зважаючи на мінімальні енергетичні витрати на їх зберігання. У той же час при перебуванні в атмосфері вологого повітря овочі здатні поглинати значну кількість води, завдяки наявності в них мікрокапілярів з середнім радіусом менше 0,1 мкм, які сорбували воду з навколишнього повітря. На цей процес сорбції роблять значущий вплив параметри мікропористої структури сушених овочів, тому вивчення цих параметрів представляє значний практичний інтерес для товарознавства [1].

Очевидно, якщо сушений продукт після сушки зберігається в звичайних умовах, тобто має місце взаємодія продукту з вологим повітрям, то кінцевий вологовміст висушеного продукту не повинен бути менше рівноважного для даних умов зберігання. Інакше під час зберігання продукт поглинатиме вологу з повітря шляхом сорбції аж до досягнення рівноважного вологовмісту. Звідси витікає, що ізотерми сорбції можуть бути використані для визначення кінцевого вологовмісту продукту (сировини) під час сушки відповідно до умов зберігання. Крім того, навіть герметично упаковані продукти (наприклад, чіпси) у разі зміни зовнішньої температури змінюють активність води в продукті, через те, що вологість продукту залишається стабільною. Особливо цей вплив має значення для таких продуктів, які містять багато цукрів і лише, якщо відносна вологість повітря менше 0,5.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рослинна сировина – картопля, буряк, гарбуз, петрушка, кріп, як і всі овочі, має малу пористість (до 10...15%) у свіжому вигляді [2]. Мабуть, у період дозрівання пористість взагалі відсутня. Тому за товарознавчо-технологічними характеристиками їх можна зарахувати до капілярно-пористих тіл. А ось після сушіння, особливо в жорсткому режимі (температура 90° С і високі градієнти тиску водяної пари всередині – сушка із змішаним теплопідводом, або СТП-сушіння) утворюється капілярно-пориста структура, яка залежить як від способу, так і від режимів сушки. Тому, після сушіння сировини отримуємо новий продукт з невідомою ДФР пористою структурою і загальною пористістю. Екстракція клітинного вмісту овочів до сушки і після, а також його концентрація показує, що після сушки вміст рослинних клітин різко змінюється [3].

Мета та завдання статті. Як показують дослідження якості сушеної продукції, у результаті процесу сушки з сировиною відбуваються необоротні процеси, які призводять до її істотних змін, – вона набуває нових властивостей. Критерієм цих змін і їх якісними характеристиками є залишковий вологовміст, відновлюваність, вміст вітаміну С і β-каротину. Нас цікавить як показник якості «відновлюваність», оскільки він безпосередньо, як було показано [4] (просочення цукатів), визначається загальною пористістю – його кінцеве значення і ДФР сировини – динаміка процесу просочення. Тому представляє інтерес порівняти процес відновлення (просочення) сушеної продукції з різною ДФР на швидкість дифузії води при цьому. Для отримання зразків з різною ДФР пор за радіусами використовували зразки моркви (Шантане) після СТП-сушки і конвективної сушки.

Виклад основного матеріалу дослідження. При звичайних вологовмістах обмежено набухаючого тіла осмотичний тиск, або тиск набухання, є функцією вологовмісту, тобто градієнт тиску набухання буде пропорційний градієнту вологовмісту.

Отже, отримаємо:

$$j = a_m \rho_0 \Delta U, \quad (1)$$

де a_m – коефіцієнт дифузії води; ρ_0 – уявна густина рослинної сировини; ΔU – градієнт вологовмісту.

Усі методи визначення коефіцієнта дифузії можна розбити на дві групи: стаціонарного і нестаціонарного масообміну [4]. При стаціонарному масообміні для визначення коефіцієнта дифузії саме і використовують рівняння вологопровідності (1). Уся трудність полягає в знаходженні густини потоку води. Градієнт вологовмісту зазвичай визначають експериментально за локальним вимірюванням вологовмісту усередині овочів або за електричним опором їх окремих шарів.

Нами запропоновано оригінальну методику визначення сумарного коефіцієнта дифузії води в рослинній сировині на прикладі моркви. Для розрахунку a_m використовували явний вид ДФР пор за радіусами $f(r)$, які знаходили сорбційним методом з використанням аналітичного виразу для ізотерм сорбції-десорбції і ДФР пор за радіусами [5]. Використання явного виду ДФР при кінетиці сушки і введення прикордонного радіусу мікрокапілярів (умовний радіус, який вважається заповненим до моменту часу τ) дозволяє визначити середній вологовміст в різні моменти часу, а, отже, і коефіцієнт дифузії води при відновленні сушеної сировини.

Градієнт вологовмісту виражається через ДФР пор за радіусами $f(r)$, пористість Π моркви:

$$\Delta U = \frac{\rho_0}{l \rho_{ж}} \Pi f(r) dr, \quad (2)$$

де $\rho_{ж}$ – густина рідини; l – середня товщина дифузійного шару (товщина моркви).

Підставляючи (2) в (1), отримаємо вираз для швидкості проникнення рідини:

$$\frac{dm}{d\tau} = \pi r^2 a_m \frac{\rho_{ж}}{l} \Pi f(r) dr, \quad (3)$$

де m – маса рідини; τ – час.

Після перетворення та розв'язку відносно вологовмісту, одержимо:

$$U = U_{\infty} \frac{a_m}{l^2} \tau \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) dr, \quad (4)$$

де $U_{\infty} = \frac{\rho_{ж}}{\rho_c} \frac{\Pi}{(1 - \Pi)}$ – максимальний вологовміст моркви; ρ_c – істинна густина сухої речовини (без врахування пористості).

Із (4) слідує, що кінетика набрякання коренеплоду залежить від його пористої структури. Морква – колоїдне капілярно-пористе тіло, моделлю для якого може служити тіло з численними мікрокапілярами циліндрового типу і скелет якого є ліофільною речовиною, тобто стінки капілярів сорбували рідину, при цьому має місце дифузійно-осмотичний зв'язок речовини, що сорбується зі скелетом тіла. У будь-який момент часу в такому тілі є як повністю або частково заповнені мікрокапіляри, так і незаповнені (порожні). Існує прикордонний радіус r_m , який відокремлює незаповнені мікрокапіляри від заповнених (частково або повністю). При малих часах заповнюються мікрокапіляри з великими радіусами, а при закінченні процесу набухання - найменші; щільність молекулярного потоку (ефузний рух пари) буде пропорційний еквівалентному радіусу молекулярного перебігу пари r . Таким чином, повинен існувати зв'язок між $U = f(r_m)$ і $U = f(\tau)$. Знайдемо цей зв'язок.

При $\tau \rightarrow \infty$ інтеграл в (4) прагне до одиниці (за умовою нормування), а $U \rightarrow U_{\infty}$ (за фізичним сенсом). Отже, величина $\frac{a_m}{l^2} \tau = \alpha$

також прагне до одиниці. Величина α за своїм фізичним сенсом характеризує ступінь заповнення капілярів (коефіцієнт заповнення).

У будь-який момент часу, як вже указувалося вище, в моркві будуть як частково заповнені капіляри ($\alpha < 1$), так і повністю заповнені ($\alpha = 1$). Величина прикордонного радіусу r_m визначається з наступних міркувань. У колоїдних капілярно-пористих тілах мають місце три механізми перенесення вологи: виборча дифузія, викликана різницею осмотичного тиску, плівкове перенесення, обумовлене градієнтом розклинюючого тиску і ефузія пари рідини, – молекулярне перенесення. При цьому коефіцієнт ефузного і плівкового перенесення залежить від

радіусу капіляра. Тому інтеграл в (4) можна представити як суму трьох доданків:

$$U = U_{\infty} \left[\frac{r_{\min}}{r_m} \int_{r_{\min}}^{r_m} f(r) dr + \frac{1}{r_m} \int_{r_{\min}}^{r_m} r \cdot f(r) dr + \int_{r_m}^{r_{\max}} f(r) dr \right], \quad (5)$$

де r_{\min} – мінімальний радіус пор.

З визначення ступеня заповнення капілярів виходить

$$\frac{r_{\min}}{r_m} = \frac{a_m}{l^2} \tau. \quad (6)$$

Позначимо $I_1 = \int_{r_{\min}}^{r_m} f(r) dr$; $I_2 = \int_{r_{\min}}^{r_m} r f(r) dr$; $I_3 = \int_{r_m}^{r_{\max}} f(r) dr$.

На початку зволоження зерна r_m великий і основний внесок в (6) вносять I_1 і I_2 до моменту насичення вологою I_1 і $I_2 \rightarrow 0$, а $I_3 \rightarrow 1$.

Вираз (5) показує, що характер залежності $U = f(1/r_m)$, і $U = f(\tau)$ повинен бути однаковим.

На рис. 1 приведена експериментальна крива зволоження моркви в дистильованій воді. Коефіцієнт відновлення β – відношення маси продукту після його обводнення до маси сирого (до сушіння).

Кухлями позначено залежність $U = f(1/r_m)$, розрахована за (5) при заданих r_m і експериментальних значеннях $U=f(\tau)$. Для розрахунку були використані значення інтегралів I_1 , I_2 , I_3 при заданих r_m .

Розрахунок коефіцієнтів дифузії при різних вологовмістах моркви вівся за наступними формулами:

$$a_m = \frac{\left(\frac{U}{U_{\infty}} - I_3 \right)}{I_1 + \frac{I_2}{r_{\min}}} \cdot \frac{l^2}{\tau}. \quad (7)$$

Мінімальний радіус пор знаходили із умови нормування

$$\frac{r_{\min}}{r_m} I_1 + \frac{1}{r_m} I_2 + I_3 = 1. \quad (8)$$

Як випливає з рис.1, експериментальна залежність $U = f(\tau)$ (суцільна крива) і розрахункові значення $U = f(1/r_m)$ -- точки на експериментальній кривій – співпадають при поєднанні масштабів часу і зворотного значення прикордонного радіусу $1/r_m$.

Товщина дифузного шару складала $3 \cdot 10^{-3}$ м. Інтеграли I_1, I_2, I_3 , обчислювали графічно. Експериментальні дані кінетики обводнення, розрахункові значення інтегралів і коефіцієнт дифузії наведені в таблиці. Характер зміни коефіцієнта a_m при різних вологовмістах визначається формою зв'язку вологи з тілом і видом вологоперенесення (перенесення пари або рідини). Безперервне збільшення коефіцієнта дифузії з підвищенням вологовмісту типових капілярно-пористих тіл характерне для вологоперенесення пари. Якщо масоперенос відбувається у вигляді рідини, то коефіцієнт дифузії може зростати або залишатися постійним залежно від виду ДФР пор за радіусами. Як показує практика, для капілярно-пористого тіла з наявністю осмотичної вологи, що характерне для моркви, зміни коефіцієнта дифузії від вологовмісту відбуваються за складною кривою.

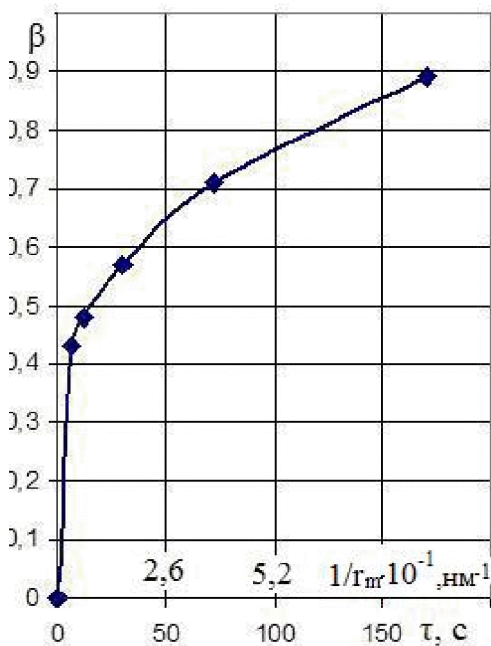


Рисунок 1 – Кінетика поглинання води морквою після СТП-сушіння

Зменшення коефіцієнта дифузії з підвищенням вологовмісту, яке спостерігається в таблиці, можна пояснити тим, що значну роль в цьому процесі (основну) відіграє ДФР, оскільки молярним перенесенням для моркви можна знехтувати (практично відсутні мікрокапіляри з $r > 10^{-7}$ м) на всьому протязі, окрім початкових декілька секунд. Виходячи з наведених значень ДФР для моркви (таблиця), на початковій стадії процесу обводнення моркви структура пор наближається до монодис-

першої (спочатку заповнюються крупні мікрокапіляри), що і викликає зростання коефіцієнта дифузії, оскільки ДФР на цій ділянці наближається до нуля, а вологоперенесення відбувається у вигляді пари або рідини. Можна стверджувати, що на першому етапі, коли заповнюються крупні пори, вони відіграють роль транспортних артерій, які доставляють молекули води до клітинних мембран моркви і сприяють, таким чином, зростанню коефіцієнта дифузії. Надалі вологоперенесення контролюється швидкістю дифузійного перенесення, яке зменшується із збільшенням вологовмісту, оскільки різко зменшуються радіуси мікрокапілярів.

Таблиця – Обчислення коефіцієнта дифузії для сушеної моркви

T=20° C – СТП-сушіння							
U (1/r)	τ , с	r_m , нм	I ₁	I ₂ , нм	I ₃	$a_m \cdot 10^6$, м ² /с	ДФР, нм ⁻¹
0,46	7,5	8	0,80	1,85	0,20	0,055	0,020
0,48	12	7	0,79	1,69	0,21	0,052	0,020
0,52	20	6	0,77	1,51	0,23	0,018	0,030
0,57	30	5	0,74	1,31	0,26	0,030	0,045
0,63	45	4	0,69	1,08	0,31	0,025	0,065
0,71	72	3	0,62	0,81	0,38	0,020	0,100
0,80	120	2	0,49	0,48	0,51	0,017	0,140
0,89	171	1,5	0,40	0,30	0,60	0,017	0,235
0,93	270	1	0,30	0,14	0,70	0,017	0,300
–	–	0,5	–	–	–	–	0,28
–	–	0,25	–	–	–	–	0,13

Оскільки об'єм води, яка заповнює капіляри, за інших рівних умов сильно залежить від радіуса (це витікає з кінетики відновлення – рис.), то із зростанням вологовмісту заповнюватися будуть дрібніші пори, яких, як впливає з ДФР, більше, ніж порівняно великих, але доступ до яких скрутніший.

Проте треба відзначити, що вищенаведений аналіз носить спрощений характер. У існуючому процесі, отримуваний експеримента-

льним шляхом закономірності є результатом сумарних дій різних чинників, врахувати які одночасно не представляється можливим.

Висновки. Таким чином, значення коефіцієнта дифузії води для сушеної рослинної сировини можуть бути розраховані по диференціальній функції розподілу пор за радіусами і кривій водопоглинення. Знайдені значення коефіцієнта дифузії можуть бути використані для оцінки якості сушеної продукції, тобто їх товарознавчих характеристик при виборі оптимальних режимів, порівняння видів сушки і енерговитрат.

Список літератури

1. Притульська, Н. В. Нові види структурованих продуктів харчування на основі рослинних компонентів [Текст] / Н. В. Притульська // Сучасні проблеми товарознавства : зб. наук. праць. – К. : Київ. держ. торг.-екон. ун-т, 1999. – С. 16.

2. Гинзбург, А. С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов [Текст] / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 27 с.

3. ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги [Текст]. – 14 с.

4. Гинзбург, А. С. Массообменные характеристики пищевых продуктов [Текст] / А. С. Гинзбург, И. М. Савина. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 280 с.

5. Захаренко, В. А. Нахождение аналитического выражения для кривых сорбции-десорбции сыпучих материалов [Текст] / В. А. Захаренко // Механика сыпучих материалов : V всесоюз. науч. конф., Одесса. – 1991. – С. 65.

Отримано 15.03.2009. ХДУХТ, Харків.

© П.П. Пивоваров, В.О. Захаренко, 2009.