

УДК 631.365.22

С.Г. Панасюк

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЯБЛУК

У статті проведено аналіз процесу сушіння яблук та визначено вплив розмірів пластин яблук на тривалість сушіння, наведено результати експериментальних досліджень зміни вологості пластинок яблук залежно від їх товщини.

Ключові слова: сушіння, яблука, товщина пластинок, теплообмін, масообмін, швидкість сушіння, сушительний агент.

Постановка проблеми. Плоди і ягоди, що споживаються людиною, забезпечують надходження необхідних речовин для життєзабезпечення організму. Розробка нових технологій для збереження плодів та ягід необхідна для зниження втрат та отримання продуктів кращої якості і поживної цінності.

Зневоднення харчових продуктів є одним з традиційних методів їх збереження. Зниження вологості до кондиційного значення пригнічує ріст мікроорганізмів і ферментативну активність, збільшує термін придатності. Сонячне сушіння та сушіння нагрітим повітрям (конвективне) є найбільш поширеними видами сушіння. Сонячне сушіння є дешевим і традиційним, але його застосування залежить від погодних умов і вимагає великих площ обробки. Крім того, необхідно захистити плоди і ягоди від комах і дрібних тварин та від контакту з джерелами бруду. При конвективному сушінні можна контролювати ці несприятливі фактори і збільшити середню швидкість сушіння.

Тим не менш, текстура сухофруктів може бути сильно пошкоджена через велике звуження твердої матриці. Усадка впливає на текстуру і збільшує теплопровідність продуктів, що призводить до зростання витрат енергії. Сублімаційне сушіння було визнане кращим процесом зневоднення для термолабільних продуктів, тому що воно дозволяє краще зберегти поживні якості продуктів. При видаленні вологи з попередньо заморожених фруктів та ягід, утворюється пориста структура, в результаті цього зневоднений продукт має кращі властивості при регідратації. Але сублімаційне сушіння є трудомістким та дорогорватісним процесом, що обмежує його використання.

Для виробництва сушених яблук з високою харчовою цінністю при мінімальних затратах тепла і енергії необхідно забезпечити високорозвинену поверхню випаровування, рівномірний її нагрів до максимально допустимої температури та скорочення тривалості сушіння.

На теперішній час актуальним є збереження енергоресурсів та пошук шляхів інтенсифікації процесу сушіння сировини. Умова інтенсифікації процесу сушіння залежить від початкової вологості матеріалу, від активної поверхні теплообміну та масообміну матеріалу в одиниці об'єму; від максимально допустимих потенціалів переносу теплоти і маси.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що процес сушіння фруктів та ягід є не достатньо вивченим, тому існує потреба в дослідженнях різних аспектів сушіння для поліпшення умов проведення процесу та його технологічних параметрів.

Мета дослідження – провести дослідження тепло- та масообміну у процесі сушіння пластин яблук.

Результати дослідження. Існує два періоди сушіння матеріалу. Спочатку відбувається прогрівання матеріалу, яке є не тривалим, і при якому вода випаровується з поверхні плодів та ягід. Далі настає період постійної швидкості сушіння, під час якого внутрішній опір масопереносу є незначним, і тиск водяної пари поблизу поверхні матеріалу дорівнює тиску насиченої пари при температурі поверхні. Період постійної швидкості сушіння триває до досягнення вологості першого критичного значення. Подальше сушіння призводить до виділення зв'язаної вологи. При цьому парціальний тиск водяних парів на поверхні матеріалу стає меншим від тиску чистої води при тій же температурі. Швидкість сушіння у цей період залежить не тільки від дифузії вологи у навколишнє середовище, а також від вологопровідності матеріалу. Цей період сушіння розглядається як другий період, який називається періодом падаючої швидкості сушіння.

Після закінчення сушіння настає рівновага матеріалу з повітрям, тобто парціальний тиск водяних парів на поверхні матеріалу стає рівним парціальному тиску водяної пари повітря.

Тривалість сушіння пластин яблук як капілярно-пористих колоїдних тіл у перший період сушіння згідно теорії сушіння [3] за початкових умов $\tau=0$, $W=W_0$ (W – вологість матеріалу, τ – час сушіння пластини яблука) може бути виражена залежністю:

$$\tau = \frac{R \cdot \rho_m \cdot (W_0 - W_{kp})}{100q_m}, \quad (1)$$

де R – характерний розмір матеріалу ($R = \delta/2$), м; q_m – інтенсивність випаровування вологи, кг/м²·год.

Інтенсифікувати процес конвективного сушіння пластин яблук можна зменшенням їх товщини та збільшенням температури і швидкості руху сушильного агента.

Інтенсивність випаровування при конвективному способі сушіння визначається відношенням [3]:

$$\alpha(t_{ca} - t_n) = rq_m - c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); r – питома теплота пароутворення води, Дж/кг; t_{ca} , t_n – відповідно температура сушильного агента та поверхневих шарів матеріалу, °С; q_m – інтенсивність видалення вологи з поверхневих шарів, кг/м²·год; c – питома теплоємність води, Дж/(кг·К); R_v – площа поверхні теплообміну, м²; ρ_0 – густина, кг/м³; $\frac{dt}{d\tau}$ – зміна температури.

З формули (2) інтенсивність випаровування визначиться:

$$q_m = \frac{1}{r} \left[\alpha(t_{ca} - t_n) + c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau} \right]. \quad (3)$$

Будемо вважати, що температура поверхневого шару пластини яблука дорівнює початковій температурі матеріалу.

Різницю між температурою поверхневого (t_n) і внутрішнього (t_e) шару пластини яблука, як об'ємного тіла, можна виразити рівнянням [5]:

$$t_n - t_e = (t_{ca} - t_0) \frac{1}{2} Ki_m \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu, \quad (4)$$

де t_0 – початкова температура матеріалу, °С; Ki_m – масообмінний критерій Кірпічова; Lu – критерій інерційності Ликова; Ko – критерій Косовича; ε – коефіцієнт фазового перетворення.

За умови встановленого процесу сушіння для об'ємних тіл різниця температури сушильного агента та початкової температури матеріалу визначиться з формули:

$$(t_{ca} - t_0)_e = \frac{\frac{1}{2} Ki_m \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu}{t_n - t_e}. \quad (5)$$

Тоді інтенсивність випаровування вологи з поверхні пластини яблука як об'ємного тіла визначиться за формулою:

$$q_m = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{2} \alpha \left(\frac{Ki_m \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu}{t_n - t_e} \right) + c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau} \right]. \quad (6)$$

При цьому із зростанням інтенсивності випаровування q_m зростатиме критерій Кірпічова Ki_m , який характеризує співвідношення між інтенсивностями зовнішнього масообміну і внутрішнього перенесення маси.

У процесі сушіння пластин яблук тепловий потік поглинається поверхневими шарами і проводиться у напрямку до центру тіла. З іншого боку, тепло від поверхні матеріалу до навколишнього повітря передається за допомогою конвекції. Масовий потік передається весь час від центру матеріалу до його поверхні.

Масовий потік можна визначити з рівняння:

$$M = F \cdot \beta \cdot (a_w \cdot p - P), \quad (7)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці між парціальними тисками; p – тиск водяної пари над продуктом; P – тиск водяної пари у повітрі; F – площа поверхні контакту.

Як на зовнішнє, так і на внутрішнє перенесення вологи і тепла має вплив форма матеріалу. Коефіцієнти тепло- і масообміну при одному і тому ж стані повітря залежно від форми матеріалу будуть набувати різних значень. Тому при використанні вказаних коефіцієнтів для розрахунку процесу сушіння необхідно враховувати довжину обтікання матеріалу повітрям.

Розглянемо процес сушіння пластинок яблук товщиною δ . У першому періоді сушіння цих пластинок можна описати таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{d^2W}{dz^2} = \frac{1}{K_c} \cdot \frac{dW}{d\tau}, \quad (8)$$

де W – вологість матеріалу; z – змінна товщина пластини яблука, яка змінюється у межах від 0 до δ ; K_c – коефіцієнт сушіння.

Прийmemo, що швидкість сушіння матеріалу у першому періоді є постійною, тоді можемо записати:

$$-K_c \cdot B_\delta \cdot \left[\frac{dW}{dz} \right]_{z=\delta} = g_D, \quad (9)$$

де B_δ – об'ємна вага сухого матеріалу.

Через деякий проміжок часу вологість матеріалу набуде свого першого критичного значення. Згідно [2] можна записати:

$$W_0 - \frac{g_D}{B_\delta \cdot \delta} \cdot \tau_{kp} = \frac{g_D \cdot \delta}{2K_c \cdot B_\delta}, \quad (10)$$

де W_0 – початкова вологість матеріалу в точці $z = 0$; τ_{kp} – час, через який вологість пластини яблука досягне свого критичного значення.

Критичну вологість у першому періоді при товщині пластини яблука $z = \delta$ можна визначити за формулою:

$$W_{kp} = \frac{g_D \cdot \delta}{2K_c \cdot B_\delta}. \quad (11)$$

У другому періоді сушіння характер протікання процесу буде визначатися як капілярною вологопровідністю матеріалу, так і умовами дифузії пари усередині шару сухого матеріалу, який розміщений між зоною випаровування і його поверхнею.

Капілярна вологопровідність пластин яблука залежить від їх вологості, що ускладнює процес отримання точних закономірностей та не дозволяє отримати кількісну оцінку цієї залежності. Враховуючи, що в кінці сушіння капілярна вологопровідність є незначною, то при визначенні впливу форми матеріалу на характер процесу сушіння у другому періоді можна прийняти, що при встановленому процесі волога переміщується лише за рахунок дифузії.

Також будемо вважати, що після того як вологість набуде критичного значення у всіх точках, між ядром та зоною випаровування вологість буде рівною W_{kp} , а елементарні шари матеріалу, які розташовані між зоною випаровування і його поверхнею, є повністю сухими.

Якщо зона випаровування вологи знаходиться на відстані δ_1 від поверхні пластини яблука, тоді швидкість сушіння можна представити у такому вигляді:

$$g_D = \frac{1}{R_D \cdot T} \cdot \frac{P_D' - P_D}{\frac{1}{\beta} + \frac{\mu \cdot \delta_1}{\sigma}}, \quad (12)$$

де P_D' – тиск насичення пари; T – температура протікання процесу; β – коефіцієнт масовіддачі; μ – коефіцієнт опору дифузії.

У кінці сушіння матеріалу зона випаровування вологи розташована на відстані $\delta/2$. Після досягнення матеріалом другої критичної вологості, швидкість сушіння починає знижуватися повільніше і при наближенні вологості до рівноважного значення, швидкість сушіння досягає нульового значення.

З метою визначення оптимальної товщини пластин яблук для сушіння було проведено експериментальне дослідження, під час якого партію яблук ділили на три групи: перша група – частинки яблук товщиною 2 мм; друга – товщиною 4 мм, третя – товщиною 6 мм. Зразки поміщали у сушильну камеру, попередньо прогріту до $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$, проводили висушування матеріалу при цій же температурі, зважуючи через однакові проміжки часу. Швидкість потоку повітря у сушильній установці під час проведення дослідження становила 2,2 м/с. Матеріал вважали висушеним, коли під час останнього зважування не спостерігалось помітного зниження маси зразків.

За отриманими значеннями побудовано графічні залежності вологості матеріалу від тривалості сушіння.

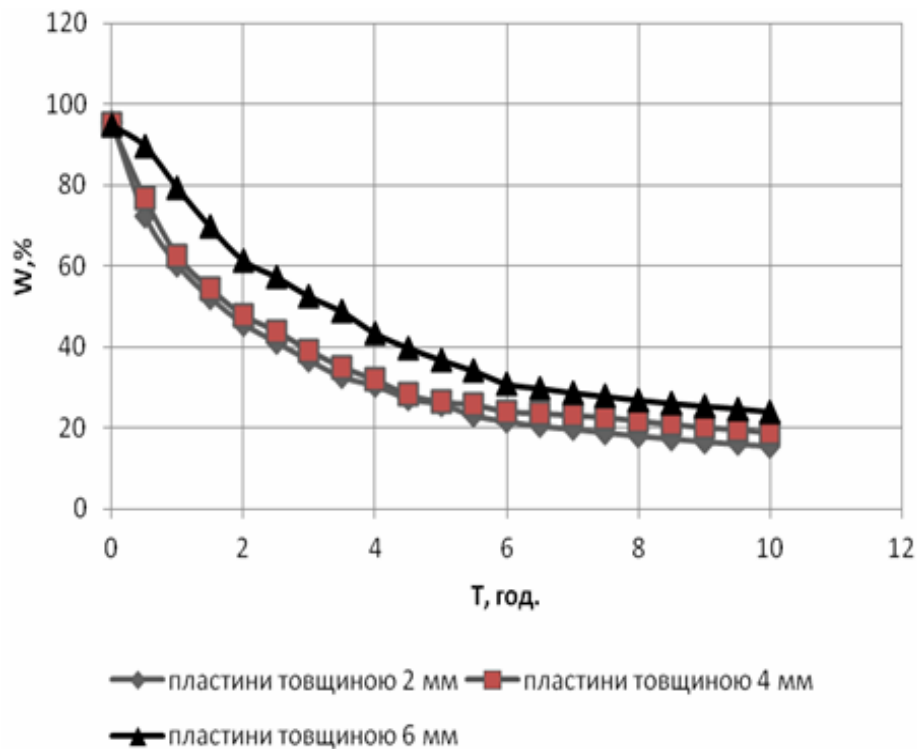


Рис. 1. Графік зміни вологості пластинок яблук різної товщини залежно від тривалості сушіння

З графіка видно, що вологість пластинок яблука товщиною 2 і 4 мм знижується майже однаково протягом певного проміжку часу. Під час сушіння пластин яблук товщиною 6 мм швидкість сушіння значно знижується. Тому оптимальною будемо вважати товщину пластин яблук від 2 до 4 мм.

Висновки

У статті досліджено процес конвективного сушіння яблук. Таким чином, процес сушіння пластин яблук визначається зовнішнім та внутрішнім вологоперенесенням. На тривалість сушіння має вплив характерний розмір пластин матеріалу. Експериментальними дослідженнями було встановлено, що пластини яблук товщиною від 2 до 4 мм швидше віддають вологу, тобто їх тривалість сушіння зменшується.

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность. – 1979. – 528 с.
2. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1968. – 599 с.
5. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
6. Лыков А.В. Тепло-массообмен. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.