

Встановлено, що найгіршими ВШХ та ШХ володіє овочерізальне обладнання, по-перше машини СЛ-30а та МПР-350, МРО-350. Тому при конструюванні або модернізації подібного обладнання слід звернути увагу на необхідність поліпшення насамперед їх ШХ.

Висновки.

1. Встановлені ВШХ технологічного обладнання з однаковою кінематичною схемою дозволяють оцінити вплив основних параметрів обладнання – продуктивності, маси та встановленої потужності електродвигуна на ШХ обладнання у октавних смугах частот та характеристики А.

2. ВШХ дозволили виявити обладнання, яке потребує поліпшення ШХ.

3. Отримані статистичні залежності ВШХ від основних параметрів обладнання дозволяють визначити ВШХ та ШХ обладнання на стадії його проектування.

Перспективою подальших досліджень є розробка конструктивних рекомендацій для очищувального та подрібнювального технологічного обладнання ресторанного господарства для поліпшення його ШХ.

Література

1. Заплетников И.Н. Виброакустические характеристики оборудования предприятий питания и методы их улучшения [Текст]: Моногр. – Донецк : ДонГУЭТ, 2005. – 265с.
2. Заплетников І.М., Кіріченко В.О., Севаторова І.С. Визначення порівняльних шумових характеристик овочерізок [Текст]/Заплетников І.М., Кіріченко В.О., Севаторова І.С. // Наукові праці / Одеська нац. акад. харч. технол. – 2010. – Вип. 37. – С.303-307.

УДК 664.83.047.8

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАРТОПЛІ ТА МОРКВИ У ВІДЦЕНТРОВОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

**Поперечний А.М., д.т.н., проф., Жданов І.В.
Донецький національний університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк**

В статті наведені результати моделювання процесу сушіння картоплі та моркви у відцентровому псевдозрідженому шарі.

Results of drying process modeling of potatoes and carrot in centrifugal pseudoreified layer are described in article.

Ключові слова: сушіння, відцентровий псевдозріджений шар, морква, картопля, моделювання.

Постановка проблеми. На практиці для розрахунків процесу сушіння найчастіше використовуються математичні моделі, які описують кінетику зміни середніх значень вологовмісту і температури матеріалу, а також дозволяють визначити тривалість сушіння. До них відносяться моделі О.В. Ликова, В.В. Краснікова, Г.К. Філоненко, Л. Страха, В.О. Потапова, О.В. Акуліча тощо [1-7]. Рідше залежність часу сушіння від робочих параметрів процесу складають у вигляді многофакторної регресійної моделі [8]. Такі моделі, хоча і не описують механізми тепло- і масопереносу, використовуються для визначення раціональних умов реалізації процесу.

Більшість вищевказаних авторів апроксимують криву швидкості сушіння у періоді спадаючої швидкості визначеною математичною залежністю, яка містить швидкість сушіння у першому періоді та чисельні коефіцієнти, що залежать від виду продукту, його початкового вологовмісту тощо.

Як відомо, в період постійної швидкості сушіння, коли видаляється в основному вільна волога, швидкість процесу лімітується зовнішнім масопереносом, тобто залежить головним чином від параметрів дифузійного середовища і характеру його взаємодії з твердою фазою.

Отже, для використання експериментальних даних з кінетики сушіння з метою проектування сушильних апаратів та визначення режиму їх роботи процес сушіння моделюється за допомогою двох основних складових – рівнянь кінетики зміни середніх значень вологовмісту та критеріального рівняння зовнішнього масообміну. Останнє визначає вплив робочих параметрів процесу на швидкість сушіння у період лінійного видалення вологи.

Такий підхід використали і ми при розробці методики розрахунку промислової сушарки з відцентровим псевдозрідженим шаром (ВПЗШ).

Метою нашої роботи є моделювання процесу сушіння картоплі та моркви у ВПЗШ.

В якості вихідних даних для розрахунку були використані криві сушіння цих овочів при різних значеннях робочих параметрів, якими при сушінні у ВПЗШ є температура та швидкість повітря, коефіцієнта заповнення сушильної камери, форма та розміри частинок продукту. Як приклад, на рис. 1 представлені кінетичні криві картоплі, отримані при різній температурі сушильного агенту. Значення інших робочих параметрів для цих кривих: форма частинок – кубики з ребром 5 мм, швидкості повітря на вході в сушильну камеру 4 м/с, початковий коефіцієнт заповнення сушильної камери 0,51. У табл. 1 наведені чисельні данні кінетичних кривих на рис. 1.

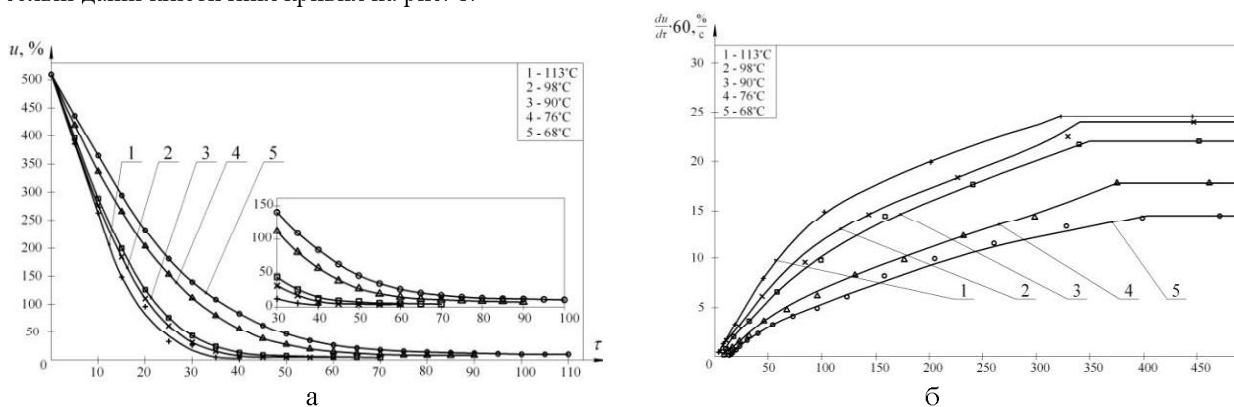


Рис. 1 – Криві сушіння (а) і швидкості сушіння (б) картоплі

Таблиця 1 – Зведена таблиця даних з кінетики сушіння картоплі

Температура повітря, °C	113	98	90	76	68
Рівноважний вологовміст, %	4,1	5,0	6,1	8,2	10,7
Тривалість сушіння, хв	40	60	70	90	110
Напруженість барабана за випаруваною вологою, кг/(ч·м ³)	1408,5	938	802,1	621,6	506
Швидкість сушіння в період лінійного видалення вологи, %/хв	24,55	23,95	22,13	17,81	14,47
Перший критичний вологовміст, %	324	342	351	376,5	404

Аналіз отриманих кривих швидкості сушіння показав, що для їх математичного опису з достатнім ступенем точності може бути використана модель О.В. Ликова [3], що передбачає заміну дійсної кривої швидкості сушіння у другому періоді прямою.

На рис. 2 наведена крива, що узагальнює криві сушіння на рис. 1. Крива побудована у координатах $(u-u_p) - N\tau$.

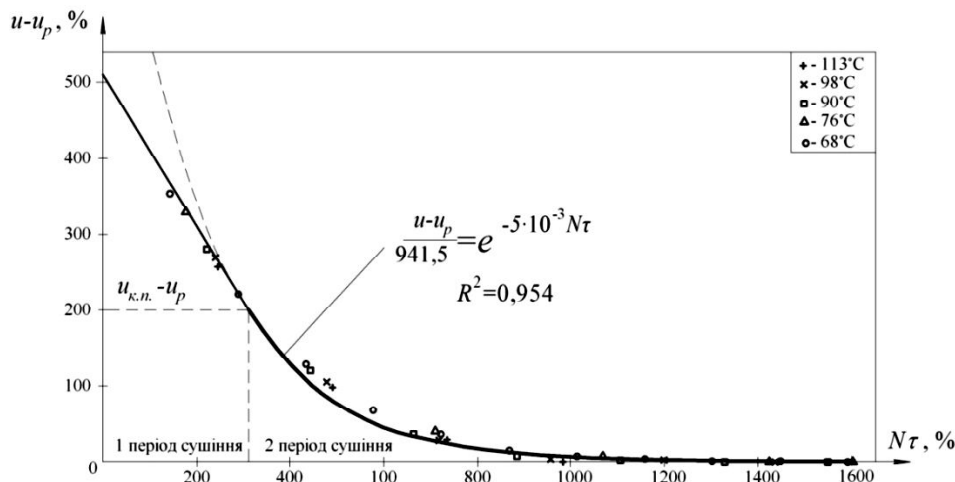


Рис. 2 – Узагальнююча крива сушіння картоплі

Значення рівноважного вологовмісту u_p і швидкості сушіння першого періоду N при побудові експериментальних точок кривої прийняті з табл. 1.

Узагальнююча крива апроксимована моделлю О.В. Ликова за допомогою метода найменших квадратів у програмі Excel. Рівняння моделі і відповідний коефіцієнт кореляції наведені на рис. 2. Коефіцієнти рівняння $\chi = 5 \cdot 10^{-3}$ та $A - u_p = 941,5$ % є, відповідно, відносним коефіцієнтом сушіння та ординатою точки перетину узагальнюючої кривої з віссю $(u - u_p)$.

Критичний приведений вологовміст, який розділяє перший і другий періоди сушіння у моделі О.В. Ликова, визначений за формулою [3]:

$$u_{к.н.} - u_p = \frac{1}{\chi} \quad (1)$$

Моделю О.В. Ликова дозволяє обчислити загальний час сушіння за формулою [139]:

$$\tau = \frac{u_0 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln \chi (u_k - u_p)}{N \chi} \quad (2)$$

де u_0 – початковий вологовміст; u_k – кінцевий вологовміст.

Для узагальненої кривої сушіння картоплі (рис. 2) будемо мати:

$$\tau = \frac{510 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln 5 \cdot 10^{-3} (u_k - u_p)}{5 \cdot 10^{-3} N} \quad (3)$$

Аналогічно обчислені математичні моделі узагальнюючих кривих сушіння і загального часу сушіння моркви:

- для кривих сушіння, отриманих при різній температурі повітря:

$$\frac{u - u_p}{710,8} = e^{-2,91 \cdot 10^{-3} N \tau}, \quad R^2 = 0,965, \quad u_{к.н.} - u_p = 344,5\% \quad (4)$$

$$\tau = \frac{630 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln 2,9 \cdot 10^{-3} (u_k - u_p)}{2,9 \cdot 10^{-3} N} \quad (5)$$

- для кривих сушіння, отриманих при різній швидкості повітря:

$$\frac{u - u_p}{679,5} = e^{-2,51 \cdot 10^{-3} N \tau}, \quad R^2 = 0,988, \quad u_{к.н.} - u_p = 400\% \quad (6)$$

$$\tau = \frac{640 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln 2,5 \cdot 10^{-3} (u_k - u_p)}{2,5 \cdot 10^{-3} N} \quad (7)$$

- для кривих сушіння, отриманих при різних значеннях коефіцієнту заповнення сушильної камери:

$$\frac{u - u_p}{1113,1} = e^{-2,21 \cdot 10^{-3} N \tau}, \quad R^2 = 0,986, \quad u_{к.н.} - u_p = 454,5\% \quad (8)$$

$$\tau = \frac{840 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln 2,2 \cdot 10^{-3} (u_k - u_p)}{2,2 \cdot 10^{-3} N} \quad (9)$$

- для кривих сушіння, отриманих при різних значеннях питомої поверхні частинок продукту

$$\frac{u - u_p}{1193,6} = e^{-2,31 \cdot 10^{-3} N \tau}, \quad R^2 = 0,979, \quad u_{к.н.} - u_p = 435,8\% \quad (10)$$

$$\tau = \frac{890,7 - u_p}{N} - \frac{1 + \ln 2,3 \cdot 10^{-3} (u_k - u_p)}{2,3 \cdot 10^{-3} N} \quad (11)$$

Визначальним параметром рівнянь (3-11) є швидкість першого періоду сушіння N , яка залежить лише від умов зовнішнього масообміну [3]. Тобто, для сушіння у ВПЗШ вона визначається коефіцієнтом масовіддачі β .

Кількісно залежність коефіцієнту масовіддачі від параметрів процесу сушіння змодельовано у вигляді відомих критеріальних залежностей [9-11], доповнених коефіцієнтом заповнення сушильної камери:

$$St = A \cdot Sc^b \cdot Re^c \cdot Gu^d \cdot \gamma^f, \quad (12)$$

$$Sh = A \cdot Sc^b \cdot Re^c \cdot Gu^d \cdot \gamma^f, \quad (13)$$

де St — число Стантона;

Sh — число Шервуда;

Sc — число Шмідта;

Re — число Рейнольдса;

Gu — число Гухмана;

γ — коефіцієнт заповнення сушильної камери;

A, b, c, d, f — константи рівнянь, що визначаються в результаті обробки експериментальних даних.

Числа Стантона і Шервуда є ціловими, адже включають коефіцієнт масовіддачі β .

При визначенні експериментальних значень чисел Рейнольдса, Шмідта і Шервуда враховувалися залежності коефіцієнта кінематичної в'язкості повітря і коефіцієнта дифузії водяної пари в повітря від температури повітря [12-14].

Для визначення констант рівнянь (12) і (13) використаний метод найменших квадратів. Константи визначались як коефіцієнти регресії множинної лінійної моделі, яка утворюється в результаті логарифмування відповідних мультиплікативних моделей [15, 16].

Для картоплі критеріальне рівняння, що узагальнює експериментальні данні на рис. 1, має наступний вигляд:

$$St = e^{26,96} \cdot Sc^{-1,325} \cdot Re^{-6,826} \cdot Gu^{-1} \quad (14)$$

Коефіцієнт заповнення γ для всіх експериментальних точок має значення 0,51. Діапазони чисел подібності, в межах яких проводилася обробка експериментальних даних: $Sc=0,634...0,654$, $Re=851,9...1009,6$, $Gu=0,109...0,193$. Коефіцієнт кореляції $R=0,997$. Відповідне кореляційне поле наведено на рис. 3, а.

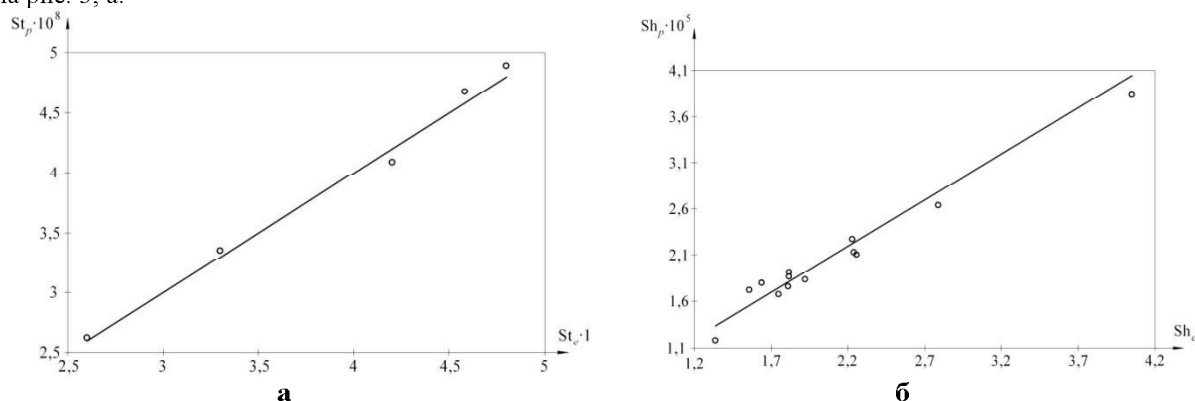


Рис. 3 – Кореляційні поля критеріальних рівнянь для картоплі (а) та моркви (б)

Для моркви критеріальне рівняння, що узагальнює експериментальні данні з сушіння при різних значеннях температури повітря, коефіцієнта заповнення сушильної камери та розмірів частинок продукту, має наступний вигляд:

$$Sh = e^{-19,019} \cdot Sc^{4,364} \cdot Re^{1,727} \cdot Gu^{0,975} \cdot \gamma^{-0,239} \quad (15)$$

Діапазони чисел подібності, в межах яких проводилася обробка експериментальних даних: $Sc=0,621...0,66$, $Re=746,6...1498,3$, $Gu=0,104...0,198$, $\gamma=0,19...0,44$. Коефіцієнт кореляції $R=0,971$. Відповідне кореляційне поле наведено на рис. 3, б.

Значення критерію Стюдента отриманих констант рівнянь (14) та (15) дозволяють оцінити ступінь впливу чисел подібності та коефіцієнта заповнення барабана на інтенсивність масообміну при сушіння у ВПЗШ. Для рівняння (15) вони наведені у табл. 2. Аналіз даних табл. 2 показує, що найбільше на інтенсивність масообміну впливають число Рейнольдса та коефіцієнт заповнення барабана.

Таблиця 2 – Значення критерію Стьюдента коефіцієнтів регресії критеріального рівняння для моркви

Аргумент рівняння	Коефіцієнт регресії	Критерій Стьюдента
Sc	4,364	4,37
Re	1,727	11,13
Gu	0,975	-2,32
γ	-0,239	6,16

Висновки. Аналіз експериментальних даних з кінетики сушіння картоплі та моркви у ВПЗШ дозволив обрати для кривих сушіння модель О.В. Ликова та визначити константи цієї моделі для експериментальних кривих. Визначальним параметром отриманих рівнянь є швидкість сушіння у першому періоді. Для кількісної оцінки впливу робочих параметрів процесу на швидкість сушіння у першому періоді на основі літературного огляду та аналізу експериментальних даних були використані критеріальні рівняння у вигляді мультиплікативних моделей. Отримані результати з моделювання процесу сушіння картоплі та моркви у ВПЗШ використані для розробки методики розрахунку промислової сушильної установки.

Література

1. Сушка пищевых растительных материалов : учеб. пособие для технолог. специальностей вузов / Г.К. Филоненко [и др.]; под общ. ред. Г.К. Филоненко - М.: Пищевая пром-сть, 1971. – 440 с.
2. Потапов, В.О. Рациональні режими сушіння овочів змішаним тепловідводом : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.О. Потапов. – Одеса, 1994. – 16 с.
3. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
4. Акулич, А.В. Расчет продолжительности сушки картофеля при комбинированном энергоподводе / А.В. Акулич, А.В. Темрук // Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодні та перспективи: тез. доп. Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 27-28 вересня 2010 р. – Частина 1 – К.: НУХТ, 2010. – С. 77.
5. Арапов, В.М. Анализ методов расчета продолжительности конвективной сушки мелкодисперсных продуктов / А.В. Арапов, М.А. Акенченко // Инновационные технологии и оборудование для пищевой промышленности (приоритеты развития): материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 22-24 сентября 2009 г. – Том 2 – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2009. – С.119-123.
6. Станкевич, Г.Н. Расчет продолжительности сушки по уравнениям кинетики с учетом конструктивных особенностей сушилок / Г.Н. Станкевич // Наук. праці ОНАХТ. – Одеса, 2006. – Вип. 28., Т.2 – С.14-20.
7. Щеглов, Н.Г. Определение продолжительности сушки растительного сырья в конвективных сушилках / Н.Г. Щеглов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – №2 – С.13-17.
8. Дерней, Й. Производство быстрорастворимых продуктов : монография / Й. Дерней. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. – 184 с.
9. Аношин, И.М. Теоретические основы массообменных процессов пищевых производств: Учеб. пособие для технолог. специальностей ВУЗов пищ. пром-ти / И.М. Аношин. – М.: Пищевая пром-сть, 1970. – 344 с.
10. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2-х кн. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.; Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Логос, Высшая школа, 2003. Кн. 1.- 912 с. Кн. 1.- 912 с.
11. Плановский, А.Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности : Монография / А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов.– М: Химия, 1979. – 288 с.
12. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии: Учебн. для хим. техникумов / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, О.З. Каган. – М.: Химия, 1967. – 848 с.
13. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учеб. пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л: Химия, 1987. – 576 с.
14. Плановский, А.Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности : Монография / А.Н. Плановский, В.И. Муштаев, В.М. Ульянов.– М: Химия, 1979. – 288 с.
15. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов / Е.Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
16. Шашков, В.Б. Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул: учебн. пособие / В.Б. Шашков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 150 с.