

УДК 664.854+621.365.3

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ НАГРІВАННЯ ВИСУШУВАНОЇ СИРОВИНИ ПРЯМИМ ЕЛЕКТРОНАГРІВОМ

Савойський О. Ю., інженер

o.savoiskyi@gmail.com

Сумський національний аграрний університет, м. Суми

Актуальність та постановка проблеми. Сушильні установки розрізняються між собою способами підведення теплоти до об'єктів зневоднення: конвективним, кондуктивним, за допомогою інфрачервоних променів, струмами високої, надвисокої частоти та ультразвуком [1–4]. Більш інноваційним способом сушіння плодоовочевої продукції є сублимаційний метод [5]. Всі перераховані способи сушіння базуються на використанні чистого виду енергії – електричної.

Основним підходом до вирішення проблеми підвищення коефіцієнту використання високопотенціальної електроенергії та економічності виробництва є інтенсифікація процесу сушіння. Найбільший ефект досягається при використанні комбінованих способів сушіння.

Основні матеріали дослідження. В запропонованому [6] способі сушіння прискорення процесу видалення вологи полягає у введенні необхідної кількості електричної енергії, для наступного перетворення в теплову, по всьому об'єму вологого тіла із мінімальною кількістю перетворень. Бажаний результат досягається використанням прямого електричного нагріву в процесі конвективного сушіння високовологої сировини.

Отримання готової продукції високої якості з максимальним збереженням корисних вітамінів та мінералів визначається тривалістю прямого електронагріву та температурою сировини в процесі сушіння.

Схема підводу теплової енергії до висушуваного об'єкту при прямому електричному нагріві за температури навколишнього середовища (коли температура тіла вище температури повітря) показана на рис. 1 [7].

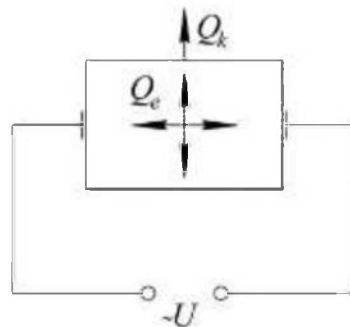


Рис. 1. Схема подачі енергії до висушуваного об'єкту:

Q_k – втрати тепла з поверхні тіла за рахунок конвективної тепловіддачі;

Q_e – тепловий потік від прямого електричного нагріву

Якщо через об'єкт, температура якого дорівнює температурі навколишнього середовища, проходить електричний струм, то температура тіла T_e поступово підвищується, оскільки вся енергія втрат при проходженні струму переходить в тепло Q_e . Частина виділеного тепла витрачається на нагрів тіла та підвищення його температури, а інша частина Q_k віддається з поверхні тіла в навколишнє середовище за рахунок тепловіддачі.

Кількість теплової енергії, що необхідна для нагріву тіла до рівноважної температури:

$$Q_s = C_s m (T_2 - T_1), \quad (1)$$

де Q_s – кількість теплової енергії, що необхідна для нагріву тіла, Дж;

C_s – теплоємність зразка, Дж/кг·°С;

m – маса зразка, кг;

T_1, T_2 – відповідно початкова та кінцева температура тіла, °С.

Рівняння теплового балансу при прямому електричному нагріві:

$$dQ_e = dQ_s + dQ_k, \quad (2)$$

де Q_e – тепла енергія, що виділяється в об'єкті при проходженні через нього електричного струму, Дж;

Q_k – тепла енергія, що втрачається з поверхні тіла за рахунок конвективної тепловіддачі, Дж.

Кількість тепла, що виділяється при проходженні електричного струму за проміжок часу

$$dQ_e = \frac{U^2}{R} d\tau_e, \quad (3)$$

де U – напруга прямого електронагріву, В

R – активний електричний опір зразка, Ом;

τ_e – тривалість прямого електричного нагріву, с.

Енергія, що втрачається з поверхні тіла за рахунок конвективної тепловіддачі:

$$dQ_k = \alpha F (T - \theta_0) d\tau_e, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

F – площа поверхні теплообміну тіла, м²;

T – поточна температура тіла,

θ_0 – температура повітря навколишнього середовища, °С.

Прийнявши $\theta_0 = T_1$, із врахуванням (1), (3) та (4) рівняння теплового балансу (2) при прямому електронагріві матиме вигляд:

$$\frac{U^2}{R} d\tau_e = C_s m \cdot d(T - T_1) + \alpha F (T - T_1) d\tau_e. \quad (5)$$

Розв'язавши рівняння (5) відносно τ_e маємо вираз для визначення тривалості нагріву тіла до кінцевої температури T_2 при прямому електронагріві:

$$\tau_e = \frac{C_s m \cdot \ln \left(1 - \frac{(T_2 - T_1) \alpha FR}{U^2} \right)}{\alpha F}. \quad (6)$$

Ефективність процесу нагрівання прямим електронагрівом визначається коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta_e = \frac{Q_s}{Q_e}. \quad (7)$$

Висновок. Отримані в роботі рівняння можуть стати складовою частиною повного математичного опису комбінованого процесу сушіння сировини, що дає можливість визначати технологічні та енергетичні показники роботи сушильного апарату.

Список використаних джерел

1. Sabarez H. Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry. *Innovative Food Processing Technologies*. 2021. P. 64-81. DOI: 10.1016/b978-0-08-100596-5.23042-4.
2. Benmeziane F. Drying of Fruits: A Mini-Review. *Novel Techniques in Nutrition & Food Science*. 2019. Vol. 3, № 5. DOI: 10.31031/ntnf.2019.03.000572.
3. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review / M. C. Karam et al. *Journal of Food Engineering*. 2016. Vol. 188. P. 32–49. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.05.001.
4. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Нестеров В. А., Неверов А. В. Исследования процесса ультразвуковой сушки. *Южно-сибирский научный вестник*. 2020. № 1 (29). С. 69–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42555024> (дата звернення: 02.10.2021).
5. Семенов Г. В., Булкин М. С., Кузенков А. В. Современные направления научных исследований и технические решения по интенсификации процесса сублимационной сушки в пищевой промышленности, фармпроизводствах и прикладной биотехнологии Ч. 1. *Научный журнал Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств*. 2015. № 1. С. 187-202. URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/11539.pdf> (дата звернення: 02.10.2021).
6. Спосіб комбінованого сушіння біологічних об'єктів: пат. 127324 Україна: МПК F26B 7/00, F26B 5/02 (2006.01) / В. Ф. Яковлев, О. Ю. Савойський, В. Ф. Сіренко. № u 201802036; заявл. 27.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14.
7. Savoiskyi O., Yakovliev V., Sirenko V. Comparative analysis of methods supplies thermal energy in high-water biological objects during drying. *ScienceRise*. 2021. Vol. 1. P. 3-10. DOI: 10.21303/2313-8416.2021.001667.