

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ЯБЛУЧНОЇ СИРОВИНИ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ

Савойський О. Ю., Яковлев В. Ф., Сіренко В. Ф.

Сумський національний аграрний університет

Отримано теоретичні та експериментальні залежності питомого електричного опору яблучної сировини в процесі сушіння при зміні температурних режимів та концентрації сухих розчинених речовин.

Постановка проблеми. В якісних раціонах харчування у розвинених країнах світу надають перевагу натуральній продукції із достатнім вмістом поживних речовин: вітамінів, мінералів, харчових волокон та ін. Значну частину цього набору продуктів складають висушені фрукти та овочі.

Так, в США на одну людину припадає в середньому до 4,5 кг сухофруктів в рік, в Норвегії – 5 кг, Швеції – 6,4 кг. В той же час в Україні даний показник знаходиться на рівні 0,6 кг [1].

Одним із стримуючих факторів розширення виробництва та споживання сухофруктів в нашій державі є висока вартість сушильного обладнання та енергоресурсів.

Пошук і розробка ефективних та енергоощадних способів сушіння є актуальною технічною задачею для переробної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі способи та пристрої для виробництва сушених овочів і фруктів мають ряд серйозних недоліків [2]. Так, поверхневі методи підводу енергії (конвективні, кондуктивні, радіаційні) мають низьку інтенсивність, призводять до нерівномірного нагріву матеріалу, значних втрат тепла, необхідності частого перемішування [3-6].

Об'ємні методи (НВЧ, ультразвук) є більш складними, але сприяють інтенсифікації процесів. Основними їх недоліками є дуже висока вартість, можливе сильне руйнування структури висушуваних продуктів, низький ККД [7-9].

Підвищити ефективність використання енергії можна у випадку прямого нагріву при пропусканні змінного електричного струму безпосередньо через вологе середовище. Такий метод набув широкого поширення в установках нагріву води та технологіях виробництва концентрованих соків [10-12].

Зазначені передумови стали основою для використання прямого електронагріву для інтенсифікації процесу видалення вологи при виробництві сушених фруктів і овочів [13-15].

Мета статті. Визначення необхідних фізико-електричних характеристик фруктів в ході зменшення вологовмісту та змінних температурних режимів для реалізації на практиці комбінованого конвективного способу сушіння із використанням прямого електро-нагріву змінним струмом промислової частоти.

Основні матеріали дослідження. Кількість підведеної теплової енергії при прямому електронагріві, насамперед, визначається величиною питомого електричного опору сировини.

В загальному випадку електричний опір зразка:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

де R - електричний опір зразка, Ом;

ρ - поточний питомий опір, Ом·м;

l - поточна довжина (висота) зразка, м;

S - площа поперечного перерізу, м².

При нагріванні біологічних об'єктів в процесі сушіння шляхом пропускання через них змінного електричного струму, одночасно з підвищенням їх температури відбувається явище електроплазмолізу, що призводить до подразнення оболонки клітин та швидкого вивільнення клітинної вологи (соку). Цей процес може тривати від часток секунд до декількох десятків хвилин, в залежності від прикладеної напруги на електроддах.

На відміну від початкового стану фруктів після такої обробки об'єкт сушіння наближається до моделі капілярно-пористого тіла із нерозчинним каркасом насиченим електропровідним соком.

В результаті збільшення кількості вільної вологи в зразку відбувається різке зменшення його питомого електричного опору. Проведені нами попередні експерименти показують, що значення питомого опору після закінчення електроплазмолізу приблизно в 10 разів менші від початкових. При цих мінімальних значеннях починається основний процес видалення вологи з матеріалу.

Раніше проведені дослідження вказують, що на електричну провідність фруктових соків впливають концентрація сухих розчинних речовин (вітаміни, мінерали, цукри і т.д) та температура, що під час сушіння змінюються в часі [16; 17]:

Залежність питомої електропровідності від концентрації сухих розчинних речовин описується рівнянням [16]:

$$\sigma = k(\alpha c + \beta \sqrt{c}), \quad (2)$$

де σ - питома електропровідність, См/м;

k - коефіцієнт зниження електропровідності;

α, β - сталі, що мають розмірність питомої електропровідності, См/м;

c - поточна концентрація сухих розчинних речовин.

Коефіцієнт зниження електропровідності [16]:

$$k = \frac{(1-0,8c)^2}{1+9c^3} \quad (3)$$

Поточна концентрація сухих розчинних речовин в нашому випадку визначається наступним чином:

$$c = \frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{пот}}^{\text{сп}} - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}, \quad (4)$$

де $M_{\text{пот}}^{\text{сп}}$ - поточна маса досліджуваного зразка, кг;

$M_{\text{сух}}$ - маса сухих нерозчинних та розчинних речовин в зразку, кг;

$M_{\text{сух}}^{\text{розч}}$ - маса сухих розчинних речовин, кг;

Поточна маса зразка в процесі сушіння:

$$M_{\text{пот}}^{\text{сп}} = M_{\text{поч}}^{\text{сп}} - m, \quad (5)$$

де $M_{\text{поч}}^{\text{сп}}$ - початкова маса досліджуваного зразка, кг,

m - поточна маса видаленої води, кг.

Залежність питомого опору від температури на основі формули Кольрауша [5]:

$$\rho = \frac{1}{\rho_{25}[1 + \alpha'(t_{\text{сп}} - 25) + \beta'(t_{\text{сп}} - 25)^2]}, \quad (6)$$

де ρ_{25} - питомий опір зразка при температурі 25 °С, Ом·м;

α' , β' - емпіричні коефіцієнти;

$t_{\text{сп}}$ - поточна температура зразка, °С.

Коефіцієнт α' залежить від природи речовини. Коефіцієнт β' збільшується закономірно зі збільшенням α' , і їх зв'язок передається наступним емпіричним рівнянням [5]:

$$\beta' = 0,0163(\alpha' - 0,0174) \quad (7)$$

Поєднуючи вирази (2)-(7) отримуємо теоретичну залежність для зміни величини поточного питомого опору в процесі сушіння:

$$\rho = \frac{\left[1 + 9 \left(\frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{пот}}^{\text{сп}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} \right)^3 \right]}{\left(1 - 0,8 \frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{пот}}^{\text{сп}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}\right)^2 [1 + \alpha'(t_{\text{сп}} - 25) + \beta'(t_{\text{сп}} - 25)^2]} \times \frac{1}{\left[\alpha \frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{пот}}^{\text{сп}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} + \beta \left(\frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{пот}}^{\text{сп}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} \right)^{0,5} \right]} \quad (8)$$

В процесі сушіння нами було відмічено, що по мірі видалення води розміри зразка значно зменшуються - відбувається усадка матеріалу, що необхідно враховувати при визначенні величини опору експериментальним шляхом. В капілярно-пористих колоїдних тілах лінійна усадка змінюється за лінійним законом.

Тому, поточна висота зразка з урахуванням усадки:

$$l = l_0 \left(1 + \beta_l \frac{M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m}{M_{\text{сух}}} \right) \quad (9)$$

де l_0 - початкова висота зразка, м;

β_l - лінійний коефіцієнт усадки;

$M_{\text{поч}}^{\text{вол}}$ - початкова маса води в зразку, кг.

Лінійний коефіцієнт усадки відповідно:

$$\beta_l = \frac{\left(\frac{l}{l_0} - 1 \right) M_{\text{сух}}}{M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m} \quad (10)$$

Помноживши (1) на l маємо:

$$R = \rho \frac{l^2}{S \cdot l}, \quad (11)$$

де $S \cdot l = V$ - об'єм води, що знаходиться в зразку, м³.

З іншого боку:

$$V = \frac{M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m}{\gamma}, \quad (12)$$

де γ - густина соку, кг/м³.

З урахуванням (9)-(12) маємо поточне значення питомого опору на основі експериментальних даних:

$$\rho = R \frac{(M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m)}{\gamma l_0^2 \left(1 + \beta_l \frac{M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m}{M_{\text{сух}}} \right)} \quad (13)$$

Для проведення вимірювань були підготовлені нарізані зразки яблук циліндричної форми, висотою 5 мм та діаметром 28 мм із однаковою масою 2,8 г. Надалі, ці зразки проходили стадію електро-плазмолізу шляхом пропускання через них змінного електричного струму частотою 50 Гц напругою 25 В, прикладеною до двох сітчастих електродів із нержавіючої сталі до торцевих частин зразка, на протязі 5 с. Тривалість електроплазмолізу визначали виходячи з [18]. Підготовлені таким чином зразки поміщались до сушильної шафи, в якій підтримувалась постійна температура в діапазоні 25-75 °С.

Через однакові проміжки часу (30 хв) визначали масу зразків, їх електричний опір та температуру. Масу зразків визначали електронними вагами МН-200.

Забезпечуючи однакову щільність контактів тих же електродів та зразків проводили вимірювання опору приладом VC61A. Температура всередині досліджуваних зразків фіксувалась приладом VC61A з термопарою ТХА типу К. При досягненні постійної маси зразка вимірювали його товщину і діаметр для визначення коефіцієнта усадки.

На основі проведених вимірювань за виразами (8) (13) проводили розрахунок поточного значення питомого опору зразків.

Результати експериментальних та теоретичних розрахунків показані на рисунках 1-4.

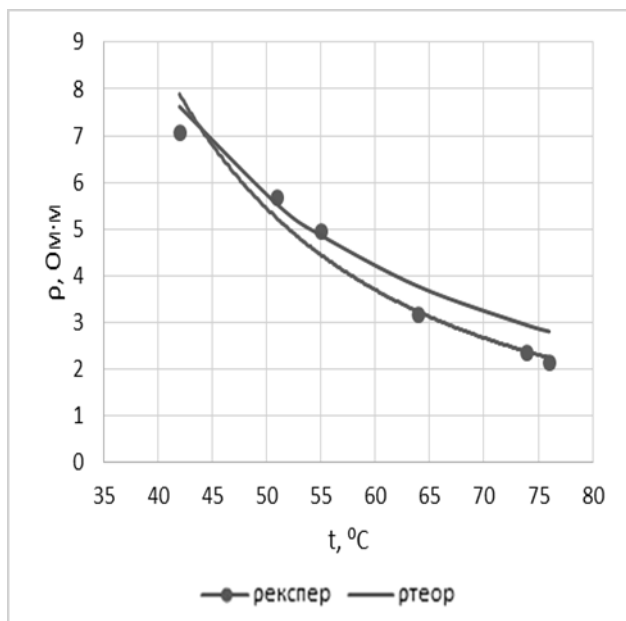


Рисунок 1 – Залежності питомого опору від температури при $M_{nom}^{sp} = 0,002$ кг.

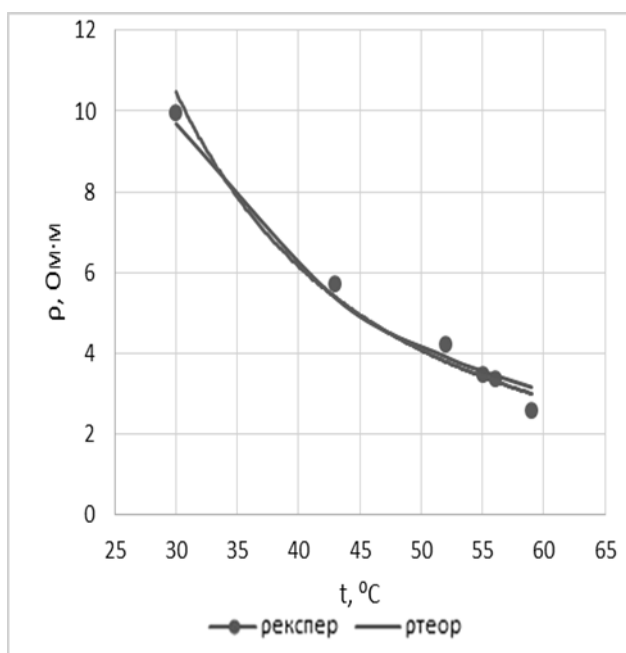


Рисунок 2 – Залежності питомого опору від температури при $M_{nom}^{sp} = 0,0015$ кг.

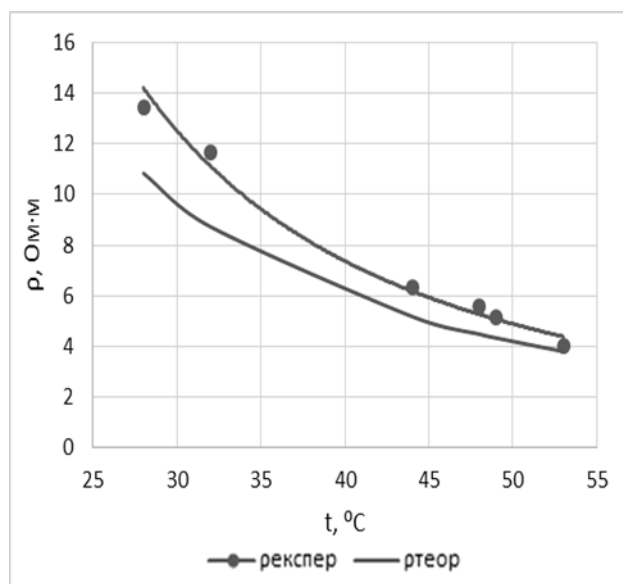


Рисунок 3 – Залежності питомого опору від температури при $M_{nom}^{sp} = 0,001$ кг.

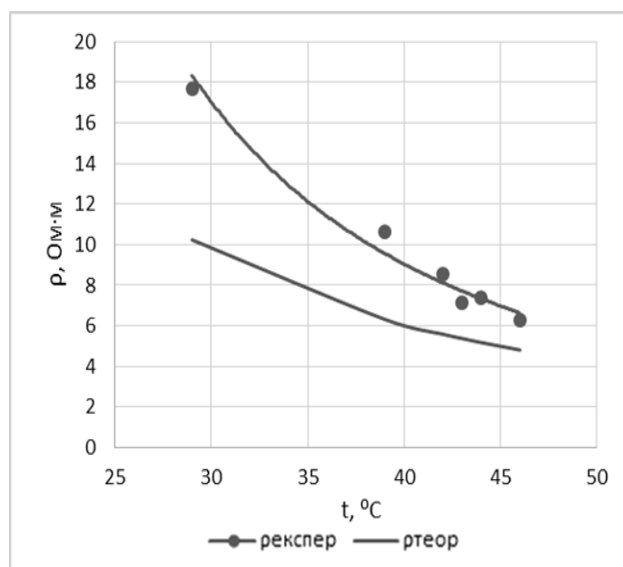


Рисунок 4 – Залежності питомого опору від температури при $M_{nom}^{sp} = 0,0007$ кг.

Результати вимірювань та розрахунків представлені на рис. 1-4 показують, що при незмінній концентрації розчинних речовин в процесі вологовидалення спостерігається трьохкратне зниження питомого електричного опору яблучної сировини при верхніх значеннях температур із робочого діапазону.

В той же час вплив зростаючої концентрації розчинних компонентів при сталій температурі зразків на величину питомого опору мінімальний.

Якщо на початку висушування питомий електричний опір знаходиться в межах 3-7 Ом·м, то при кінцевій вологості, достатній для застосування електронагріву, він зростає до 7-14 Ом·м.

Ці величини опорів дають можливість використовувати в процесах сушіння режими нагріву при невисоких градієнтах напруги.

На рис. 4 відмічається значне розходження між експериментальними і теоретичними значеннями, що пояснюється підсиханням поверхні зразка, яке тягне за собою погіршення електричного контакту з електродом та призводить до збільшення вимірних значень опору. Використання прямого електричного нагріву на даному етапі є неможливим.

Висновки.

1. Отримані дослідні і розрахункові залежності питомого опору зразків яблук від внутрішніх параметрів об'єктів сушіння: температури зразка і концентрації розчинних речовин.

2. Встановлена нижня межа вологовмісту для ефективного використання прямого електричного нагріву.

3. Результати досліджень дають необхідні дані для розробки енергозберігаючого технологічного процесу сушіння фруктів із дотриманням показників якості.

Список використаних джерел

1. Дьякова Ю. В. Стан та перспективи розвитку ринку сушених овочів. *Продукты & Ингредиенты*. Київ, 2013. № 9(106). С.37-39.
2. Савойський О. Ю. Аналіз методів сушки плодовоовочевої сировини та їх класифікація. *Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка*. 2016. №175. С. 85–88.
3. Атаназевич, В. И. Сушка пищевых продуктов: справочное пособие. Москва : ДеЛи, 2000. 296 с.
4. Касьянов Г. И. Сушка сырья и производство сухих завтраков: учебно-практическое пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : ИКЦ "МарТ", Ростов-на-Дону : издательский центр "МарТ", 2004. 160 с.
5. Хабибов Ф. Ю., Гойибова Д. Ф. Исследование процесса сушки тыквы при комбинированном энергоподводе. *Молодой ученый*. 2014. №21. С. 238-240.
6. Франко Е. П. Касьянов Г. И. Особенности процесса сушки плодов и овощей. *В мире научных открытий*. 2010. № 4. С.176-177.
7. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. / Хмелев В. Н., Сливин А. Н., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н., Шалунов А. В. Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 203с.
8. Пенкин А. А. Разработка устройства инфракрасного излучения для термической обработки зерна и локального обогрева: автореф. дисс.канд. техн.наук. - Москва, 2005. 20с.
9. Застосування акустичних технологій в аграрному виробництві: Навчальний посібник / Іноземцев Г. Б., Яковлев В. Ф., Козирський В. В. Киев : ТОВ "Аграр Медіа Груп", 2013 171 с.
10. Попов А. М. Тихонов Н. В., Тихонова И. Н. Исследование технологических процессов для концентрации и стерилизации соков методом прямого нагрева. *Техника и технология пищевых производств*. 2013. №1. С. 81–87.
11. Электроплазмолиз винограда с применением биполярных импульсов / Попова Н. А., Папченко А. Я., Болога М. К. *Электронная обработка материалов*. 2014. №50. С. 83–91.
12. Интенсификация теплообмена в биологической среде электроплазмолизом / Ботошан Н. И., Болога М. К., Берзой С. Е. *Электронная обработка материалов*. 2005. №1. С. 68–75.
13. Яковлев В. Ф. Взаємний вплив електричного та акустичного нагрівання біологічних продуктів у технологічному процесі сушіння. *Вісник Сумського національного аграрного університету, серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів"* 2017. Вип. 10 (32). С. 131-134.
14. Яковлев В. Ф. Використання прямого електричного нагріву в технологічному процесі комбінованого сушіння фруктів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2018. №195. С. 91–96.
15. Спосіб комбінованого сушіння біологічних об'єктів : пат. 127324 Україна, МПК (2018.01) F26B 7/00, F26B 5/0.2 (2006.01). / В.Ф. Яковлев, О.Ю. Савойський, В.Ф. Сиренко. № у 2018 02036; заявл. 27.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14. 4 с.
16. Побережець І. І., Побережець В. І. Електропровідність яблучного та виноградного соків. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2016. Вип. 89(1). С. 229-235.
17. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия: учеб. для хим.-технолог. спец. вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. Москва : Высш. шк., 1984. 519 с.
18. Молчанов Г.И. Интенсивная обработка лекарственного сырья. Москва : Медицина, 1981. 208 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЯБЛУЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Савойский А. Ю., Яковлев В. Ф.,
Сиренко В. Ф.

Получены теоретические и экспериментальные зависимости удельного электрического сопротивления яблочного сырья в процессе сушки при изменении температурных режимов и концентрации сухих растворимых веществ.

Abstract

RESEARCH OF QUANTITY OF UNIT ELECTRICAL RESISTANCE APPLE RAW IN THE DRYING PROCESS

A. Savoiskyi, V. Yakovlev,
V. Sirenko

Theoretical and experimental dependences of the unit electrical resistance of apple raw material during drying under changing temperature conditions and the concentration of soluble solids are obtained.