

# ВЗАЄМНИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА АКУСТИЧНОГО НАГРІВАННЯ БІОЛОГІЧНИХ ПРОДУКТІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ СУШІННЯ

В. Ф. Яковлев, професор  
О. Ю. Савойський, ст. викладач  
Сумський національний аграрний університет

Теоретично обґрунтовано взаємний вплив електричного та акустичного нагрівання біологічного продукту на швидкість процесу при інфрачервоній конвективній сушці, для інтенсифікації процесу зневоднення продукту, з метою подальшого використання в практиці проектування і технічній реалізації методу.

**Ключові слова:** комбінована сушка, електричний нагрів, акустичне нагрівання, енергозатрати, інтенсивність, частота, коефіцієнт зменшення вологості, коефіцієнти впливу, коливальний процес.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Як було відмічено раніше, одним із важливих питань в технологічному процесі переробки сільськогосподарської продукції є впровадження нових високоефективних методів обробки, установок і технологій з оптимальним технічним рішенням. Аналіз показує, що існуючі методи сушки досить дорого коштують, енергоємні і іноді малоефективні [1]. Тому наукові дослідження, які направлені на вирішення задачі інтенсифікації процесу сушіння і водночас зниження витрат енергоносіїв є актуальними.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На сьогодні в літературі описана велика кількість методів інтенсифікації процесу сушки, в тому числі з використанням електрофізичних впливів на висушуваний продукт. Відомі методи акустичної сушки високої інтенсивності та електроконтактного нагріву плодоовочевої сировини струмом підвищеної частоти 5-25 кГц [2, 6]. Однак, у більшості випадків відомим методам характерні використання підвищених полів температур та значні енергозатрати, крім цього, їм притаманні недоліки, які суттєво знижують якість кінцевого продукту: змінюється колір, смак і його природній аромат, знижується його відновлюваність при замочуванні. Також більшість розроблених методів сушки пов'язані з особливостями конкретного виду та сорту овочів та фруктів, що не дозволяє уніфікувати підхід до питань розробки вказаних методів зневоднення та технічних систем на їх основі. Викладене вище дозволяє сформулювати основні задачі та принципи розробки нових методів сушіння та можливість їх комбінації для зменшення енергозатрат в процесі обробки сировини.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Теоретичне обґрунтування взаємного впливу електричного та акустичного нагрівання біологічного продукту на швидкість процесу його сушіння для подальшого використання в практиці проектування і технічній реалізації методу.

**Основні матеріали досліджень.** Метою сушіння продукту є зниження його вологості до

рекомендованого стандартом значення, що забезпечує його тривале збереження та відповідні якісні показники. В процесі нагрівання продукту проходить випаровування вологи  $W_{пе}$ , що містить в собі продукт на початковій стадії сушіння тільки електричним методом, а  $W_{па}$  - при сушінні тільки акустичним методом. Якщо передбачити застосування тільки одного з видів нагріву, наприклад, електричного, то зниження вологості пропорційно початковій  $W_{пе}$ , при цьому швидкість випаровування може бути визначено, як:

$$\frac{dW_e}{dt} = -k_e W_{пе} \quad (1)$$

де  $k_e$  - коефіцієнт зменшення вологості, який залежить від температури навколишнього середовища та інтенсивності нагрівання; причому  $k_e > 0$ .

При застосуванні тільки акустичного нагрівання та з урахуванням того, що зниження вологості пропорційно початковій  $W_{па}$ , швидкість випаровування може бути визначено, як:

$$\frac{dW_a}{dt} = -k_a W_{па} \quad (2)$$

де  $k_a$  - коефіцієнт зменшення вологості, який залежить від температури навколишнього середовища та інтенсивності нагрівання; причому  $k_a > 0$ .

Тоді сумісна дія обох видів нагріву буде описуватися наступними диференціальними рівняннями:

$$\frac{dW_e}{dt} = -W_{пе}(k_e + \beta_e W_{па}) \quad (3)$$

$$\frac{dW_a}{dt} = -W_{па}(k_a - \beta_a W_{пе}) \quad (4)$$

де  $\beta_e, \beta_a$  - коефіцієнти впливу електричного та акустичного видів нагріву на швидкість зменшення вологи в продукті, відповідно.

Враховуючі те, що процес сушіння починається з однієї початкової вологості продукту, тобто  $W_{пе} = W_{па} = W_{пеа}$ , то рівняння, наприклад (3) можна представити у наступному вигляді:

$$\frac{dW_{пеа}}{dt} = -W_{пе}(k_e + \beta_e W_{пе}) = -k_e W_{пе} - \beta_e W_{пе} W_{пе} = -k_e W_{пеа} - \beta_e W_{пеа}^2 \quad (5)$$

Якщо взяти другу похідну виразу (5) та просумувати отримаємо однорідне лінійне диференціальне рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 W_{\text{неа}}}{dt^2} + k_e \frac{dW_{\text{неа}}}{dt} + 2\beta_e W_{\text{неа}} = 0 \quad (6)$$

Тоді характеристичне рівняння для виразу (6) буде мати вигляд:

$$p^2 + k_e p + 2\beta_e = 0 \quad (7)$$

Коренями характеристичного рівняння (7) є:

$$p_{1,2} = \frac{-k_e \pm \sqrt{k_e^2 - 8\beta_e}}{2} \quad (8)$$

В залежності від значення підкореневого виразу у (8) загальне рішення рівняння (6) може мати три види [3]:

- при  $k_e^2 - 8\beta_e = 0$ :

$$W_{\text{неа}} = C_1 e^{p_1 t} + C_2 t e^{p_1 t} \quad (9)$$

- при  $k_e^2 - 8\beta_e > 0$ :

$$W_{\text{неа}} = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (10)$$

- при  $k_e^2 - 8\beta_e < 0$ :

$$W_{\text{неа}} = e^{pt} C_1 \cos \alpha t + C_2 \sin \alpha t \quad (11)$$

Граничні значення підкореневого виразу (8), відповідних умов (9) – (11), визначаються із наступного рівняння:

$$\lim_{(k_e^2 - 8\beta_e) \rightarrow 0} (k_e^2 - 8\beta_e) = \lim_{k_e \rightarrow 1} k_e^2 - 8 \lim_{\beta_e \rightarrow 1} \beta_e \quad (12)$$

З (12) граничні значення підкореневого виразу (8) дорівнюють:

$$8 \lim_{\beta_e \rightarrow 1} \beta_e = 1, \text{ тобто } \beta_e = \frac{1}{8} = 0,125 \quad (13)$$

$$\lim_{k_e \rightarrow 1} k_e^2 = 1, \text{ тобто } k_e = 1 \quad (14)$$

Із (13) та (14) видно, що значення підкореневого виразу (8) буде залежить від співвідношення коефіцієнтів ефективності  $k_e$  та  $\beta_e$ , тобто:

- при  $k_e = n$ , а  $\beta_e = 0,125n$ :

$$k_e^2 - 8\beta_e = 0 \quad (15)$$

загальне рішення диференційного рівняння (6) приймається у вигляді (9);

- при  $k_e = n$ , а  $\beta_e < 0,125n$ :

$$k_e^2 - 8\beta_e > 0 \quad (16)$$

загальне рішення диференційного рівняння (6) приймається у вигляді (10);

- при  $k_e = n$ , а  $\beta_e > 0,125n$ :

$$k_e^2 - 8\beta_e < 0 \quad (17)$$

загальне рішення диференційного рівняння (6) приймається у вигляді (11).

Умови (15) – (17) вказують на те, що при відповідному виборі значень  $k_e$  та  $\beta_e$ , які пов'язані з параметрами того чи іншого виду процесу нагрівання, можна регулювати процесом сушіння біологічного продукту. Залежності  $W_{\text{неа}} = f(t)$  при сумісній дії додаткових видів

нагрівання до кожної із умов (15) – (17) і відповідно до них рішень диференційних рівнянь (9) – (11) та подібні залежності при кожному із додаткових  $W_{\text{пе}} = f(t)$  та  $W_{\text{па}} = f(t)$  і традиційному  $W_{\text{тп}} = f(t)$  видах сушіння, наведено на рисунку 1. Якщо виконати відповідні перетворення та інтегрування рівнянь (1) і (2), отримаємо:

$$W_e = W_{\text{пе}} e^{k_e t}; \quad W_a = W_{\text{па}} e^{k_a t} \quad (18)$$

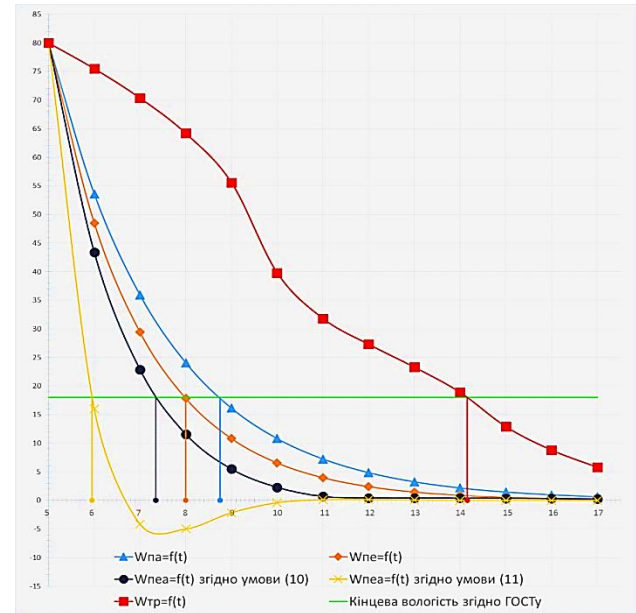


Рисунок 1 – Залежності зміни вологості продукту від тривалості процесу сушіння при різних методах сушіння

Із рисунку 1 видно, що застосування додаткових видів нагрівання продукту (електричного та акустичного) значно знижують тривалість процесу сушіння у порівнянні, як з традиційним, так і з застосуванням тільки одного додаткового із видів нагріву (або електричного, або акустичного).

Крім того, при сумісній дії обох видів нагріву, коефіцієнт електричного нагріву  $k_e$  буде тим нижче, чим більше вплив на початкову вологість при дії акустичного нагріву  $W_{\text{па}}$  та навпаки. Якщо зробити допущення, що коефіцієнт зниження вологості  $k_e$  зменшується на величину  $\beta_e W_{\text{па}}$ , яка пропорційна  $W_{\text{па}}$ , у зв'язку зі збільшенням дії акустичного виду нагріву, а коефіцієнт  $k_a$  зменшується на величину  $\beta_a W_{\text{пе}}$ , яка пропорційна  $W_{\text{пе}}$ , у зв'язку зі збільшенням дії електричного виду нагріву, то помноживши рівняння (3) на  $\beta_a$ , а рівняння (4) на  $\beta_e$  та просумувавши їх [4,5], отримаємо:

$$\beta_a \frac{dW_{\text{пе}}}{dt} + \beta_e \frac{dW_{\text{па}}}{dt} = k_e \beta_a W_{\text{пе}} - k_a \beta_e W_{\text{па}} \quad (19)$$

Помноживши рівняння (3) на  $k_a/W_{\text{пе}}$ , а рівняння (4) на  $k_e/W_{\text{па}}$ , та просумувавши їх, отримаємо:

$$k_a \frac{1}{W_{\text{пе}}} \frac{dW_{\text{пе}}}{dt} + k_e \frac{1}{W_{\text{па}}} \frac{dW_{\text{па}}}{dt} = k_a \beta_e W_{\text{па}} - k_e \beta_a W_{\text{пе}} \quad (20)$$

Після перетворення, отримаємо:

$$\beta_a \frac{dW_{пе}}{dt} + \beta_e \frac{dW_{па}}{dt} - k_a \frac{d \ln W_{пе}}{dt} - k_e \frac{d \ln W_{па}}{dt} = 0 \quad (21)$$

Інтеграл від виразу (21) буде мати наступний вигляд:

$$\beta_a W_{пе} + \beta_e W_{па} - k_a \ln W_{пе} - k_e \ln W_{па} = C \quad (22)$$

Вираз (22) можна представити у наступному вигляді:

$$e^{-\beta_a W_{пе}} \cdot e^{-\beta_e W_{па}} \cdot W_{пе}^{k_a} \cdot W_{па}^{k_e} = C \quad (23)$$

Для дослідження виду інтегральних кривих, представимо вираз (23) у наступному вигляді:

$$W_{пе}^{-k_a} e^{\beta_a W_{пе}} = C \cdot W_{па}^{k_e} \cdot e^{-\beta_e W_{па}} \quad (24)$$

Вираз (24) можна представити у наступному вигляді:

$$Y = W_{пе}^{-k_a} e^{\beta_a W_{пе}} \quad (25)$$

$$X = W_{па}^{k_e} \cdot e^{-\beta_e W_{па}} \quad (26)$$

А з урахуванням виразів (25) та (26) отримаємо наступне співвідношення:

$$Y = CX \quad (27)$$

Для виявлення характеру впливу кожного із додаткових видів нагріву на рисунку 2 побудовані криві залежностей (25) - (27) у координатах  $X$ ,  $W_{па}$ ,  $Y$ ,  $W_{пе}$  (див. рис.2) [3,6]. У першому та третьому квадрантах нанесено, відповідно, криві залежностей  $Y = f(W_{пе})$  та  $X = f(W_{па})$ . У другому квадранті побудована залежність  $Y = CX$ . По цим залежностям побудована інтегральна крива, яка відображена у четвертому квадранті (див. рис.2). Принцип побудови інтегральної кривої видно з рисунку.

Із аналізу інтегральної кривої видно, що взаємодія двох додаткових видів нагрівання має коливальний характер, тобто вказує на те, що зміною параметрів методів нагрівання (напруги, струму, частоти - при електричному методі, або інтенсивності, частоти - при акустичному) можна регулювати тривалість процесу сушіння та значення енергетичних витрат на його здійснення.

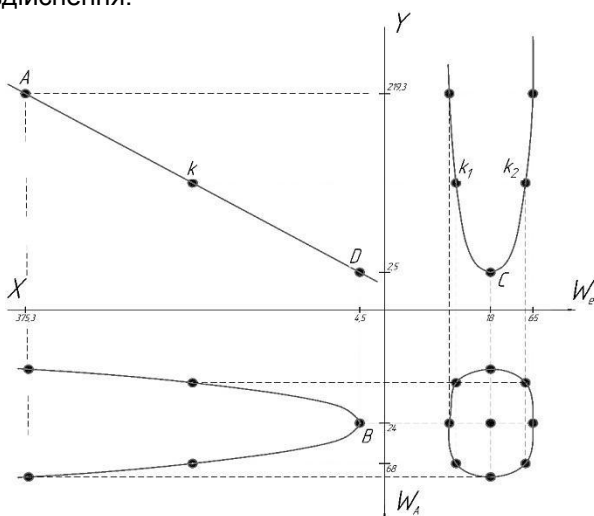


Рисунок 2 - Визначення характеру процесу взаємної дії електричного та акустичного методів нагрівання продукту.

**Висновки.** Проведені теоретичні дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Тривалість процесу сушіння при застосуванні одного виду нагріву продукту (або електричного, або акустичного) має визначений час.

2. Електричний вид нагріву дає більший ефект процесу сушіння (при постійній температурі навколишнього середовища) ніж при застосуванні акустичного методу.

3. Як електричний, так і акустичний методи сушіння, при одночасній дії традиційного методу (конвективного), дає значне скорочення тривалості процесу сушіння.

4. Застосування додаткових методів (електричного та акустичного) у сукупності з традиційним дає значне скорочення часу процесу сушіння в порівнянні з кожним із окремих видів (див. рисунок 1).

5. З рисунку 2 видно, що процес впливу електричного та акустичного методів на тривалість сушіння носить коливальний характер, який вказує на те, що зміною параметрів того чи іншого із видів додаткових методів (напруги, струму, частоти - при електричному методі, або інтенсивності, частоти - при акустичному) можна регулювати тривалість процесу, його енергоємність та автоматизувати сам процес сушіння.

6. Отримані результати теоретичних досліджень надають передумови для підготовки та проведення відповідних експериментальних досліджень.

### **Список використаної літератури:**

1. Савойський О.Ю. Аналіз методів сушки плодоовочевої сировини та їх класифікація / О.Ю. Савойський // Вісник Харківського національного технічного університету ім. Петра Василенка. – 2016. - №175. – С.85-88.
2. Іноземцев Г.Б. Застосування акустичних технологій в аграрному виробництві: Навчальний посібник / Іноземцев Г.Б., Яковлев В.Ф., Козирський В.В. – К.: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2013 – 171 с.
3. Овчинников П.Ф. Высшая математика: Учеб. Пособие/ П.Ф. Овчинников, Б.М. Лисицын, В.М. Михайленко; Под общ.ред. П.Ф. Овчинникова. – К.: Выща шк., 1989 – 679 с.
4. Іноземцев Г.Б. Технологія наукових досліджень енергетичних систем в аграрному виробництві: Навчальний посібник. / Г.Б. Іноземцев, В.В.Козирський. За редакцією Г.Б. Іноземцева. – К.: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2011. – 198 с.
5. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. / Бесекерский В.А., Попов Е.П. М. - «Наука», Гл. ред. физ-мат лит., 1989. – 768 с.
6. Способ сушки и обеззараживания фруктов и ягод; пат. 2194228 Российская Федерация: F26B3/347, A23B7/02 / И.М. Чекрыгина, В.Г Букреев, А.Д. Еремин; заявитель и патентообладатель «Таганрогский научно-исследовательский институт связи». - № 2000123044/13 ; заявл. 04.09.2000 ; опубл. 10.12.2002.

### **Яковлев В.Ф., Савойский А.Ю. Взаимное влияние электрического и акустического нагрева биологических продуктов в технологическом процессе сушки**

*Теоретически обосновано взаимное влияние электрического и акустического нагрева биологического продукта на скорость процесса при инфракрасной конвективной сушке для интенсификации процесса обезвоживания продукта, с целью дальнейшего использования в практике проектирования и технической реализации метода.*

**Ключевые слова:** комбинированная сушка, электрический нагрев, акустический нагрев, энергозатраты, интенсивность, частота, коэффициент уменьшения влажности, коэффициенты влияния, колебательный процесс.

### **Yakovlev V., Savoiskyi A. Relative effect of electrical and acoustic heating of biological products in the technological solution process**

*The mutual influence of the electrical and acoustic heating of a biological product on the speed of the process with infra-red convection drying has been theoretically grounded in order to intensify the process of dehydration of the product, with the aim of further use in the practice of designing and technical implementation of the method. It has been proved mathematically that the use of additional methods (electric and acoustic) in combination with the traditional gives a significant reduction in the drying time compared to each of the individual species. It is determined that the process of the influence of electric and acoustic methods on the duration of drying is oscillatory, indicating that the change in the parameters of one or another of the types of additional methods (voltage, current, frequency - in an electrical method, or intensity, frequency - with acoustic) you can adjust the duration of the process of its energy consumption and automate the drying process itself. The obtained results of theoretical research provide the preconditions for preparation and conducting of corresponding experimental researches.*

**Keywords:** combined drying, electric heating, acoustic heating, energy consumption, intensity, frequency, coefficient of humidity reduction, coefficients of influence, vibrational process.