

УДК 664.8.047

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ
ТА ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ НА ПРОЦЕС
СУШІННЯ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Яковлев В.Ф., к.т.н.,
Савойський О. Ю., інженер
Сумський національний аграрний університет
Тел. (099)762-50-39

Анотація – в роботі досліджено вплив ультразвукових коливань та прямого електричного нагріву струмом промислової частоти на інтенсифікацію процесу зневоднення. Складено рівняння регресії неповного другого порядку на основі повного факторного експерименту.

Ключові слова – біологічний об'єкт, сушіння, ультразвук, прямий електронагрів, рівняння регресії.

Постановка проблеми. Процес сушіння, що полягає у видаленні вологи з матеріалу, з одного боку, є одним з ключових етапів різних технологічних процесів, з іншого боку, однією з найбільш енергозатратних стадій обробки сировини. Якість і швидкість реалізації процесу сушіння в значній мірі визначають якість і собівартість кінцевого продукту. Збереження енергетичних ресурсів, зниження втрат сировини, поліпшення якості одержуваних продуктів вимагає розробки і впровадження нових високоефективних методів обробки, установок і технологій з оптимальним технічним рішенням. Тому наукові дослідження, які направлені для вирішення даної проблеми є актуальними.

Аналіз останніх досліджень. Розробка економічних режимів процесу сушіння залишалася і залишається в центрі уваги науковців різних країн [1, 2, 3]. Великий внесок у теорію і техніку сушіння фруктів внесли А. К. Ангерсбах, М.А. Гришин, Б. В. Зозулевич, С.Г. Ільясов, З.А. Кац, А.А. Силич, Е.А. Шевцова, Р.І. Ярославський. На основі проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій в [4] встановлено, що використання відомих способів сушіння фруктів супроводжується рядом недоліків: велика тривалість сушки, неможливість використання високих температур повітря через імовірність перегрівання і пригорання продукту, втрат вітамінів і біологічно-активних речовин,

утворення плівки на поверхності фруктів, що затрудняє процес випаровування вологи. 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). На основі експериментальних досліджень процесу сушіння біологічного об'єкту в радіаційно-конвективній сушарці отримати залежності зміни вологості продукту при взаємному використанні додаткових методів нагріву (електричного та акустичного) для подальшого використання в практиці проектування і технічній реалізації методу.

Основні матеріали дослідження. Отримані результати теоретичного обґрунтування взаємного впливу електричного та акустичного нагрівання біологічного продукту на швидкість процесу його сушіння в [5] надали передумови для підготовки та проведення відповідних експериментальних досліджень.

Дослідження впливу ультразвукових коливань та прямого електронагріву на процес сушіння проводилися на дослідній установці, структурна схема якої наведена на рисунку 1.

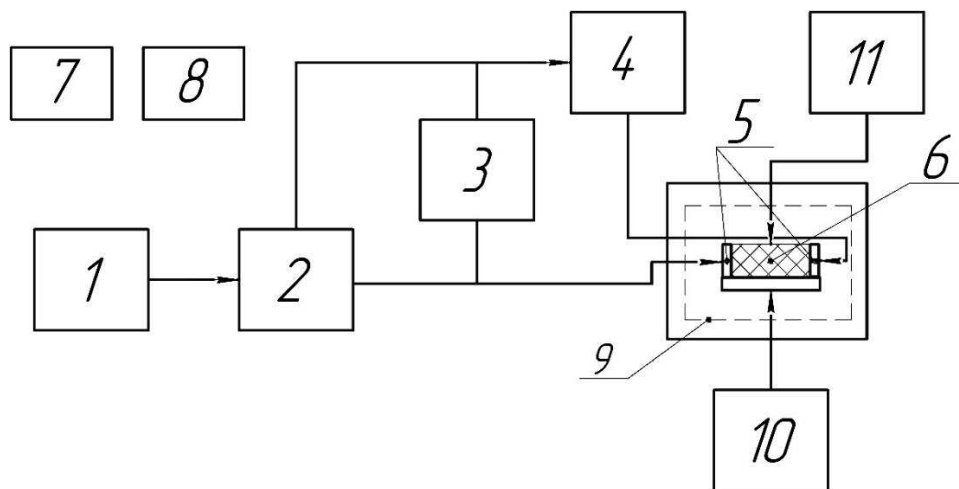


Рис. 1. Структурна схема дослідної установки:

1 – джерело живлення; 2 – ЛАТР; 3 – вольтметр; 4 – міліамперметр; 5 – електроди; 6 – досліджуваний зразок; 7 – таймер; 8 – електронні ваги; 9 - сушильна шафа; 10 – джерело ультразвуку; 11 – термопара

Запропонована експериментальна установка складається з сушильної шафи радіаційно-конвективного типу з автоматичним підтриманням температури, ультразвукового генератора 10, джерела струму промислової частоти 1, двох електродів 5 між якими поміщався шар продукту 6. Для визначення параметрів процесу в електричне коло для прямого електронагріву включені лабораторний автотрансформатор 2, вольтметр 3 та міліамперметр 4. Для визначення зміни

маси зразків використовувалися електронні ваги 8 з точністю вимірювання до 0,01г. Для дослідження зміни температури досліджуваних зразків використовувалась термопара ТХА (хром-алюміній) типу К.

Процес сушіння в запропонованій дослідній установці здійснюється наступним чином. Попередньо підготовлений продукт поміщається між двома електродами на ультразвуковий випромінювач у сушильну камеру конвективно-радіаційного типу. Під дією електричного струму промислової частоти, що проходить між двома електродами, матеріал нагрівають до допустимої температури. Ультразвукові коливання подають одночасно з прямим електронагрівом, комбінуючи періоди їх дії різної тривалості та частоти. Міграція вологи із внутрішніх шарів матеріалу відбувається під дією градієнту тиску, що створюється накладеними ультразвуковими коливаннями, а також за рахунок електроплазмолізу оболонки клітин. Видалення цієї вологи з поверхні розділу матеріал – навколишнє середовище забезпечується потоком нагрітого повітря.

На підставі апріорної інформації встановлено, що на ефективність процесу сушіння запропонованим методом впливають наступні фактори:

- температура в сушильній шафі;
- час перебування зразка в сушильній шафі;
- швидкість циркуляції повітря в сушильній шафі;
- значення напруги при прямому електронагріві;
- час прямого електронагріву зразка;
- частота ультразвукових коливань;
- час обробки зразків ультразвуком.

Експеримент проводили з фіксованими швидкістю циркуляції повітря та часом перебування зразка в сушильній шафі, часом прямого електронагріву та обробки ультразвуком. Тому, очевидно, фіксування цих факторів на відомих рівнях при проведенні дослідів і включення їх з подальшого розгляду буде правомірним.

Ефективність процесу сушіння визначається кінцевим вмістом вологи в готовому продукті. Тому в якості функції відгуку обрано масу видаленої із зразка вологи.

Перед проведенням експерименту були призначені рівні варіювання факторів та проведено їх кодування (таблиця 1).

Таблиця 1 – Значення факторів та параметри їх варіювання

Фактор	-1	0	+1	Інтервал варіювання
x_1 - температура в сушильній шафі, $^{\circ}\text{C}$	30	40	50	$\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$
x_2 - значення напруги при прямому електронагріві, В	30	45	60	$\Delta U = 15 \text{ В}$
x_3 - частота ультразвукових коливань, кГц	22	11	44	$\Delta f = 11 \text{ кГц}$

Математична модель, складена на основі результатів, отриманих при реалізації плану повного факторного експерименту для трьох факторів, виглядає наступним чином:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

де y – функція відгуку;

x_1, x_2, x_3 – фактори, що визначають протікання процесу;

b_0, b_1, b_2, b_3 і т.д. – емпірично визначені коефіцієнти.

Для знаходження оптимального поєднання виділених факторів проведений експеримент, що включає 8 дослідів. Матриця планування експерименту і обчислені середні значення досліджуваного параметру процесу представлені в таблиці 2. Для усунення випадкової помилки експерименту визначення значення параметру при кожному досліді проводилися три рази.

Таблиця 2 – Розрахункова матриця експерименту

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	S_n^2
1	-	-	-	+	+	+	0,86	0,92	0,81	0,8633	0,0061
2	+	-	-	-	-	+	1,23	1,42	1,38	1,3433	0,0201
3	-	+	-	-	+	-	0,92	0,83	0,98	0,9100	0,0114
4	+	+	-	+	-	-	1,1	1,02	1,2	1,1067	0,0163
5	-	-	+	+	-	-	0,86	0,98	1,01	0,9500	0,0126
6	+	-	+	-	+	-	0,82	0,99	1,05	0,9533	0,0285
7	-	+	+	-	-	+	1,43	1,6	1,57	1,5333	0,0165
8	+	+	+	+	+	+	1,52	1,43	1,38	1,4433	0,0101
$S_E = 0,1214$											

Після реалізації експерименту і отримання значень досліджуваного параметру проводилася побудова математичної моделі. Насамперед проводилася оцінка експериментальних даних на відтворюваність за методикою, наведеною в [6] з використанням критерія Кохрена за виразом

$$G_{розр} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{n=1}^N S_n^2} \leq G_{\alpha}(\gamma - 1, N), \quad (2)$$

де S_{\max}^2 - максимальна дисперсія дослідів;

$\sum_{n=1}^N S_n^2$ - дисперсія експерименту;

G - табличне значення критерія Кохрена;

α - рівень значимості;

γ - число повторень одного дослідів;

N - кількість дослідів.

$$G_{розр} = \frac{0,0285}{0,1214} = 0,0066 \leq G_{0,05} = 0,5157.$$

Так як значення критерія Кохрена по дослідним даним не перевищує його критичне значення робимо висновок, що рівняння регресії буде відтворюваним.

Розрахунок коефіцієнтів регресії здійснювали методом найменших квадратів за наступними виразами:

- коефіцієнт при вільному члені рівняння регресії

$$b_0 = \sum_{n=1}^N \frac{\bar{y}_n}{N} ; \quad (3)$$

- коефіцієнти при лінійних членах рівняння

$$b_i = \sum_{n=1}^N \frac{x_{in} \bar{y}_n}{N} ; \quad (4)$$

- коефіцієнти при взаємодії факторів

$$b_{ij} = \sum_{n=1}^N \frac{x_{in} x_{jn} \bar{y}_n}{N}. \quad (5)$$

В першому наближенні рівняння регресії з розрахованими коефіцієнтами буде виглядати наступним чином

$$y = 1,1379 + 0,0737x_1 + 0,1104x_2 + 0,082x_3 + 0,0763x_1x_2 +$$

$$+0,2x_1x_3 + 0,1579x_2x_3 . \quad (6)$$

По абсолютній величині коефіцієнтів можна зробити висновок, що застосування додаткових видів нагрівання продукту дають більший ефект сушіння у порівнянні з традиційним, а їх одночасна взаємодія – як у порівнянні з традиційним, так і з застосуванням тільки одного з додаткових видів нагріву (або електричного, або акустичного).

Значимість коефіцієнтів рівняння регресії визначалася за виразом

$$|b_i, b_{ij}| \geq t_{кр} \sqrt{S_i^2} , \quad (7)$$

де $t_{кр}$ - критичне значення критерія Стьюдента для заданого рівня значимості α та f_2 степенів вільності;

S_i^2 - дисперсія коефіцієнтів рівняння.

Відповідно,

$$|b_i, b_{ij}| \geq 2,12 \sqrt{\frac{0,0076}{8}} = 0,065.$$

З врахуванням значимості коефіцієнтів рівняння (6) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \epsilon = & 1,1379 + 0,0737x_1 + 0,1104x_2 + 0,082x_3 + 0,0763x_1x_2 + \\ & + 0,2x_1x_3 + 0,1579x_2x_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Адекватність математичної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера за умовою

$$F_{розр} = \frac{\gamma S_R / f_1}{S_E / f_2} < F_{кр} , \quad (9)$$

де $F_{розр}$ - розрахункове значення критерію Фішера;

S_R - остаточна сума квадратів дисперсії;

$F_{кр}$ - критичне значення критерію Фішера, для заданого рівня значимості α , та степенів вільності f_1 і f_2 .

Для зручності всі розрахунки по оцінці адекватності приведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Розрахункова матриця для визначення остаточної суми квадратів дисперсії

№ п/п	b_0x_0	b_1x_1	b_2x_2	b_3x_3	$b_{12}x_1x_2$	$b_{13}x_1x_3$	$b_{23}x_2x_3$	\bar{x}	\bar{y}	$(\bar{x} - \bar{y})^2$
1	1,138	-0,074	-0,110	-0,082	0,076	0,2	0,158	0,906	0,863	0,002
2	1,138	0,074	-0,110	-0,082	-0,076	-0,2	0,158	1,301	1,343	0,002
3	1,138	-0,074	0,110	-0,082	-0,076	0,2	-0,158	0,932	0,910	0,000
4	1,138	0,074	0,110	-0,082	0,076	-0,2	-0,158	1,088	1,107	0,0003
5	1,138	-0,074	-0,110	0,082	0,076	-0,2	-0,158	0,921	0,950	0,001
6	1,138	0,074	-0,110	0,082	-0,076	0,2	-0,158	1,012	0,953	0,003
7	1,138	-0,074	0,110	0,082	-0,076	-0,2	0,158	1,538	1,533	0,00003
8	1,138	0,074	0,110	0,082	0,076	0,2	0,158	1,438	1,443	0,00002
$S_R = 0,0088$										

Тоді,

$$F_{розр} = 3,485 < F_{кр} = 4,49.$$

Оскільки умова виконується можна зробити висновок, що отримане рівняння регресії (9) є адекватним.

Висновки.

1. Застосування додаткових видів нагрівання продукту дають більший ефект сушіння у порівнянні з традиційним, а їх одночасна взаємодія – як у порівнянні з традиційним, так і з застосуванням тільки одного з додаткових видів нагріву (або електричного, або акустичного).

2. Розроблена математична модель процесу сушіння біологічних об'єктів може бути використана при конструкторській розробці технології комбінованого сушіння та відповідного технічного засобу.

Література:

1. Хабибов Ф. Ю., Гойибова Д. Ф. Исследование процесса сушки тыквы при комбинированном энергоподводе / Ф. Ю. Хабибов, Д. Ф. Гойибова // Молодой ученый. — 2014. — №21. — С. 238-240.

2. Ботошан Н. И. Интенсификация теплообмена в биологической среде электроплазмолизом / Н. И. Ботошан, М. К. Болога, С. Е. Берзой. // Электронная обработка материалов. – 2005. – №1. – С. 68–75.

3. Хмелёв В.Н., Савин И.И., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Лебедев А.Н., Левин С.В., Хмелёв М.В. Система ультразвуковой сушки на основе пьезоэлектрического бесконтактного излучателя. Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и на-

учных исследованиях: Межвузовский сборник /Под редакцией Г.В. Леонова, АлтГТУ, БТИ, 2005.

4. *Савойський О. Ю.* Аналіз методів сушки плодоовочевої сировини та їх класифікація / *О. Ю. Савойський.* // Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка. – 2016. – №175. – С. 85–88.

5. *Яковлев В. Ф.* Взаємний вплив електричного та акустичного нагрівання біологічних продуктів у технологічному процесі сушіння / *В. Ф. Яковлев, О. Ю. Савойський.* // Вісник Сумського НАУ. – 2017. – №10 (32). – С. 119–128.

6. *Богданович Н.И.* Расчеты в планировании эксперимента. Учебное пособие. / *Н. И. Богданович.* – Л. : изд. ЛТА: 1978. – 80с

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ПРЯМОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ НА ПРОЦЕСС СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Яковлев В.Ф., Савойский А.Ю.

Аннотация – в работе исследовано влияние ультразвуковых колебаний и прямого электрического нагрева током промышленной частоты на интенсификацию процесса обезвоживания. Составлено уравнения регрессии неполного второго порядка на основе полного факторного эксперимента.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF MUTUAL INFLUENCE OF ULTRASOUND VIBRATIONS AND DIRECT ELECTRON HEATING ON THE PROCESS OF DRYING BIOLOGICAL OBJECTS

V. Yakovlev, A. Savoiskyi

Summary

The influence of ultrasonic oscillations and direct electric heating by the current of the industrial frequency on the intensification of the dehydration process was studied. The regression equations of incomplete second order are compiled on the basis of the full factorial experiment.