

УДК 664.8.047:634.11

DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-247-257

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПЛАЗМОЛІЗУ ЯБЛУЧНОЇ СИРОВИНИ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ

Савойський О. Ю.

ORCID: 0000-0002-6459-4931

*Сумський національний аграрний університет*

e-mail: o.savoiskyi@gmail.com

*Постановка проблеми.* Поряд із розвитком технологій довготривалого зберігання яблук у свіжому вигляді традиційно використовується ефективний спосіб зберігання яблучної сировини в зневодненому стані. Заготівля сушених яблук в обмежених у часі умовах вимагає інтенсифікації технологічних процесів і розробки енергоощадного сушильного обладнання.

З метою інтенсифікації процесів зневоднення останнім часом все більше уваги приділяється об'ємним методам підводу тепла, серед яких прямий нагрів безпосереднім пропусканням електричного струму через висушуваний матеріал [1-4].

При нагріванні біологічних об'єктів змінним електричним струмом, одночасно з підвищенням їх температури відбувається явище електроплазмолізу [6]. Механізм даного явища досить складний та до кінця не вивчений, тому дослідження направлені на визначення закономірностей електроплазмолізу є актуальними.

*Аналіз останніх досліджень.* Електроплазмоліз - спосіб незворотного руйнування цитоплазматичних оболонок клітин електричним струмом, що призводить до швидкого вивільнення клітинної вологи (соку). Даний ефект широко використовується в технологічних процесах виготовлення концентрованих соків, консервування харчових продуктів та як метод попередньої обробки сировини перед сушінням [1-10].

Проведені авторами [6-9] дослідження, показали, що попередня обробка рослинної сировини електричним струмом покращує вихід соку на 10-20%.

У роботах [1-5] розглядаються способи сушіння, при яких фрукти і овочі проходили попередню обробку омичним нагріванням. Результати експериментів показують, що в порівнянні з контрольними зразками, тривалість сушіння обробленої сировини зменшується в середньому на 20-35%.

Крім того, в процесі обробки електричним струмом відбувається знезараження продукції від шкідливих мікроорганізмів [10].

*Формування цілей статті.* Метою даної роботи є дослідження впливу температури повітря в сушильній шафі та напруженості електричного поля, підведеного до яблучної сировини, на процес електроплазмолізу з отриманням математичних залежностей комбінованого сушіння та для вибору оптимальних режимів обробки.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- отримати залежності для визначення тривалості електроплазмолізу в досліджуваному діапазоні зміни режимних параметрів процесу сушіння, зокрема, температури повітря в сушильній шафі та напруженості поля прямого електронагріву;

- дослідити залежності електричного опору яблук та отримати емпіричний вираз для визначення поточного значення опору оброблюваної сировини в процесі сушіння в період електроплазмолізу.

*Основні матеріали дослідження.* При пропусканні електричного струму через біологічний об'єкт рослинного походження сила його, в зв'язку з руйнуванням діелектричних мембран клітин, постійно зростає та при повному руйнуванні цитоплазматичних оболонок досягає максимального значення. При цьому відзначається значне зниження електричного опору рослинної сировини, що є критерієм оцінки та керування процесом електроплазмолізу.

Раніше проведені дослідження показують, що тривалість досягнення пікових значень в значній мірі залежить від градієнта напруги та відстані між електродами [5, 6].

У роботі [6] запропоновано вираз для визначення часу електроплазмолізу плодово-ягідної сировини. Однак, даний вираз справедливий для швидкопротікаючого процесу електроплазмолізу при градієнтах напруги вище 1000 В/см. Виходячи із необхідності отримання готової висушеної яблучної продукції належної якості, нами запропонована технологія сушіння з використанням низькоградієнтного електроплазмолізу - до 40 В/см. Крім того, проведені попередні експерименти показують, що крім вищезгаданих параметрів на тривалість даного явища також впливає температура повітря в сушильній шафі [11].

Дослідження електроплазмолізу яблук у процесі комбінованого сушіння проводилися на експериментальній установці, схема якої представлена на рис. 1.

Експериментальні дослідження проводили за наступною методикою.

Попередньо підготовлені яблука нарізали дисками висотою 5 мм та діаметром 28 мм.

Після встановлення блоками керування 6 певного режиму сушіння, зразки встановлювалися між сітчастими електродами 10 та поміщалися всередину сушильної шафи 1 на сітчастий піддон 2. Надалі через лабораторний автотрансформатор 7 на електроди подавалась напруга відповідного значення частотою 50 Гц.

Експерименти проводилися при заданих температурних режимах в сушильній шафі 25-55<sup>0</sup>С та напруженістю електричного поля на електродах 20-40 В/см. Швидкість теплоносія становила 0,2 м/с та підтримувалася постійною протягом всього процесу.

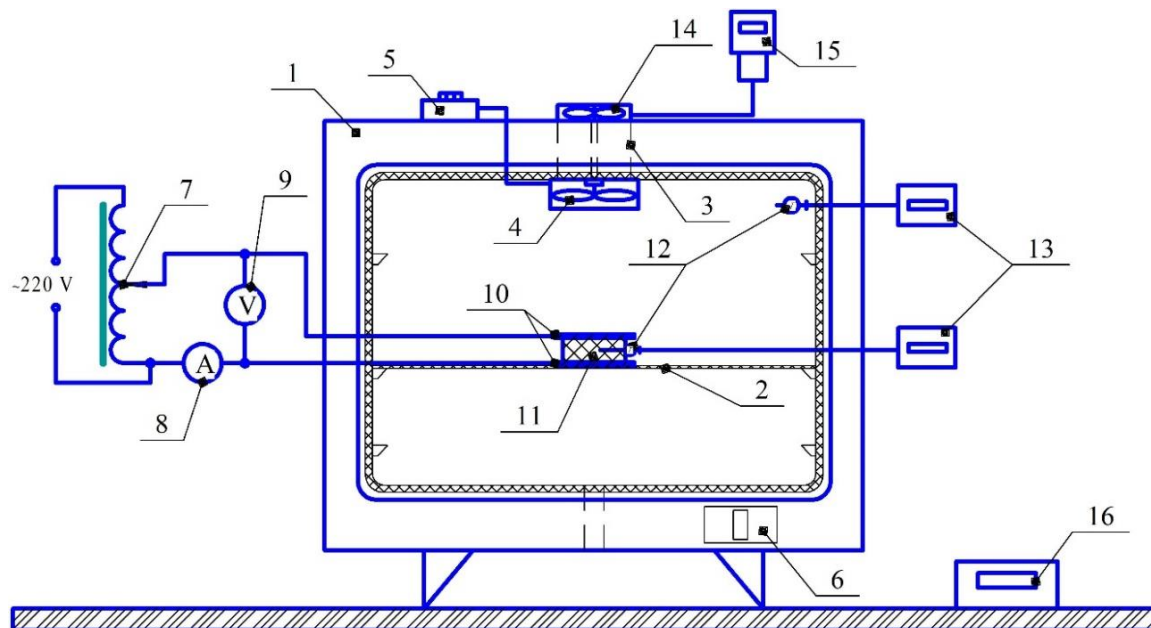


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

- 1 - сушильна шафа; 2 - сітчастий піддон; 3 - вентиляційні канали;
- 4 - осьовий вентилятор; 5 – блок керування обертами вентилятора;
- 6 - блок автоматичного керування температурою в сушильній шафі;
- 7 - лабораторний автотрансформатор; 8 - лабораторний міліамперметр; 9 - лабораторний вольтметр; 10 - сітчасті електроди;
- 11 - досліджуваний зразок; 12 - датчики температури (термопари);
- 13 - покажчики температури; 14 – крильчатка анемометра;
- 15 – анемометр; 16 - таймер

Через встановлені проміжки часу лабораторними міліамперметром 8 та вольтметром 9 фіксувалися показання сили струму, що протікала через зразок та напруга на електродах. Розрахунок електричного опору висушеної сировини проводили методом вольтметра-амперметра. Часові інтервали визначали таймером 16.

У табл. 1 наведено результати експериментальних досліджень залежності часу досягнення пікових значень сили струму ( $\tau_{en}$ , с) від

температури повітря в сушильній шафі ( $t_{нов}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) та відповідній напруженості поля ( $E$ , В/см) при прямому електронагріві.

Таблиця 1 - Тривалість досягнення пікових значень сили струму  $\tau_{еп}$  при температурі повітря в шафі 25-55 $^{\circ}\text{C}$  та напруженості електричного поля 20-40 В/см

$t_{нов}$ , $^{\circ}\text{C}$ \ $E$ , В/см	20	25	30	35	40
25	10550	3450	1550	760	480
40	4700	2250	1200	670	445
55	2350	1360	930	619	407

Аналіз отриманих даних (табл. 1) показує, при збільшенні напруженості з 20 до 40 В/см тривалість електроплазмолізу зменшується на 25-30%. Водночас підвищення температури повітря в сушильній шафі з 25 до 55 $^{\circ}\text{C}$  скорочує час електроплазмолізу на 6-17% при відповідних градієнтах напруги на електродах.

Математична залежність тривалості часу електроплазмолізу яблук від температури повітря в шафі та напруженості електричного поля визначена методом лінеаризації функції та представлена графічними залежностями даних табл. 1 в логарифмічних координатах (рис. 2).

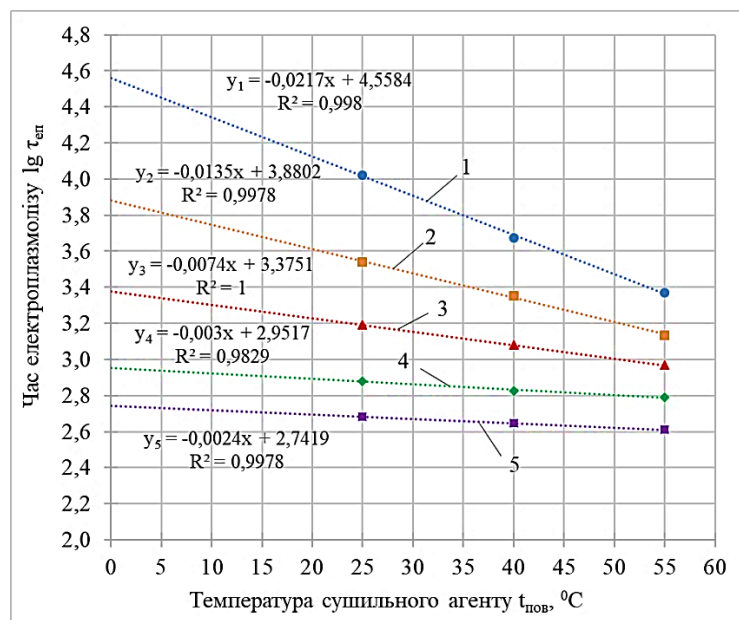


Рис. 2. Залежності часу електроплазмолізу від температури повітря в сушильній шафі в логарифмічних координатах при напруженості електричного поля прямого електронагріву: 1 - 20 В/см; 2 - 25 В/см; 3 - 30 В/см; 4 - 35 В/см; 5 - 40 В/см.

Залежність часу електроплазмолізу  $\tau_{en}$  від температури повітря в сушильній шафі  $t_{нов}$  описується рівнянням:

$$\lg \tau_{en} = \alpha t_{нов} + k, \quad (1)$$

де  $\tau_{en}$  - час електроплазмолізу, с;

$t_{нов}$  - температура повітря в сушильній шафі,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  - кут нахилу графіка;

$k$  - відхилення на графіку, що дорівнює часу електроплазмолізу при температурі повітря  $t_{нов}=0^{\circ}\text{C}$ .

Із рівнянь апроксимації (рис. 2) видно, що кут нахилу та відхилення графічних залежностей змінюються зі збільшенням напруженості електричного поля прямого електронагріву.

На рис. 3 та 4 представлено графіки  $\alpha = f(E)$  та  $k = f(E)$  відповідно.

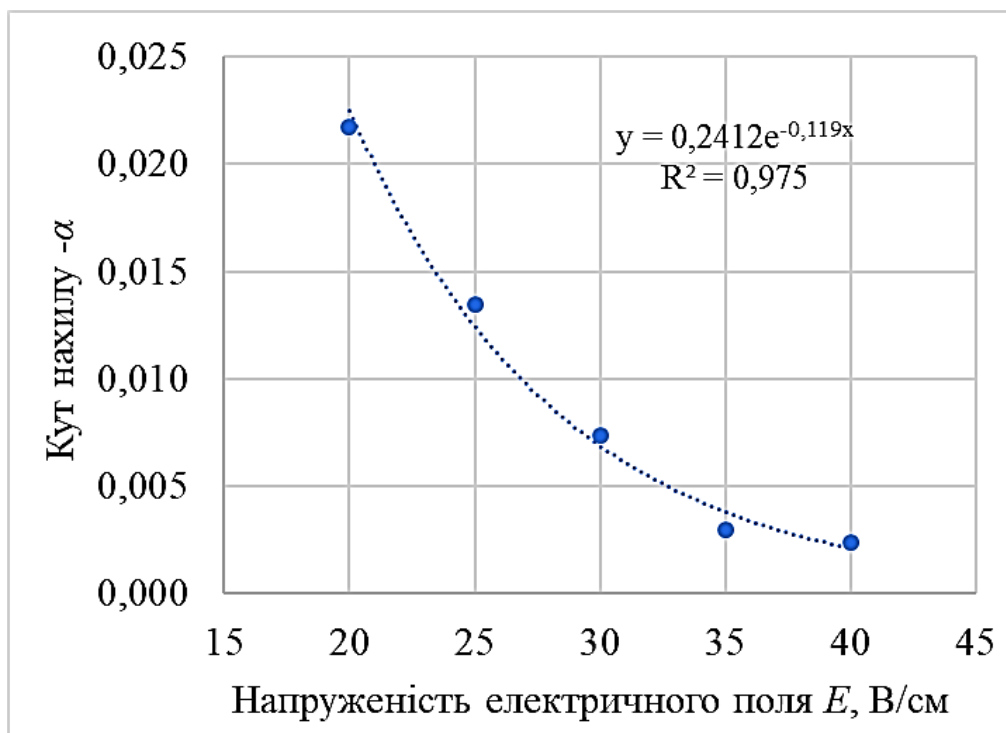


Рис. 3. Залежність кута нахилу  $\alpha$  від напруженості електричного поля прямого електронагріву

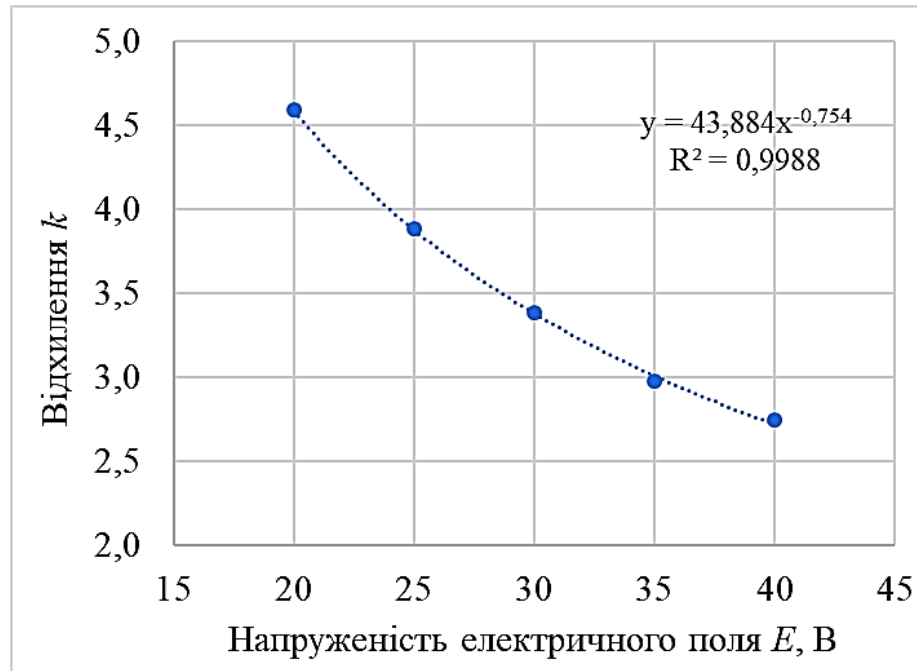


Рис. 4. Залежність величини відхилення  $k$  від напруженості електричного поля прямого електронагріву

У результаті наступної апроксимації отримані рівняння, що описують залежності  $\alpha$  та  $k$  від напруженості електричного поля:

$$\alpha = 0,2412e^{-0,119E} \quad (2)$$

$$k = 43,884E^{-0,754} \quad (3)$$

З урахуванням (2) та (3) остаточний вираз для визначення часу електроплазмолізу яблучної сировини в процесі сушіння:

$$\lg \tau_{en} = 0,2412e^{-0,119E} t_{nos} + 43,884E^{-0,754} \quad (4)$$

Отримана залежність (4) справедлива у досліджених діапазонах температури сушильного агента та напруженості електричного поля, а саме  $25^{\circ}\text{C} < t_{nos} < 55^{\circ}\text{C}$  та  $20 \text{ В/см} < E < 40 \text{ В/см}$  відповідно. Коефіцієнт достовірності апроксимації у всіх випадках лежить в діапазоні 0,975-0,998, що є досить прийнятним та характеризує згладжування, як достовірне.

Важливим параметром в енергетичній характеристиці сушіння є змінний в часі електричний опір яблучної сировини.

Для проведення опису математичної моделі запропонованого комбінованого способу сушіння з використанням прямого електронагріву необхідно знати величину електричного опору

оброблюваної сировини. Проведені нами дослідження в [11, 12] показують, що опір змінюється протягом всього процесу сушіння та залежить від вологості та температури матеріалу. Крім того, фрукти і овочі є живими об'єктами та по-різному реагують на пропускання через них електричного струму.

Отримані результати експериментальних досліджень [11, 13] процесу комбінованого сушіння показують, що залежності зміни опору фруктів в період електроплазмолізу можна описати рівняннями типу:

$$R = \frac{R_0}{\tau^n}, \quad (5)$$

де  $R$  - поточне значення електричного опору сировини в процесі сушіння, Ом;

$R_0$  - початкове значення електричного опору сировини, Ом;

$\tau$  - час, с.

Показник степені  $n$  характеризує швидкість зміни величини опору і залежить від температури повітря в сушильній шафі та напруженості електричного поля при прямому електронагріві (рис. 5).

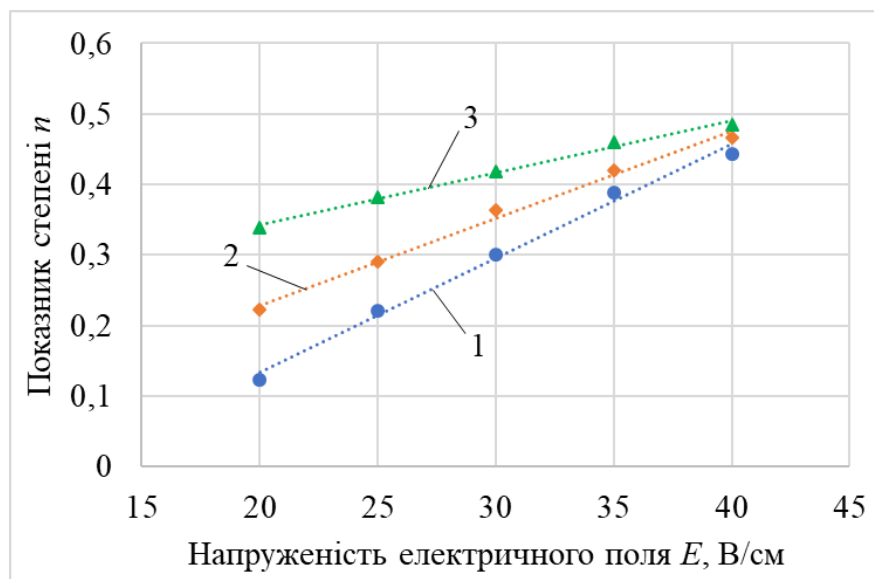


Рис. 5. Залежності показника степені  $n$  від напруженості електричного поля при температурі повітря в сушильній шафі: 1 - 25°C; 2 - 40°C; 3 - 55°C.

За результатами експериментальних досліджень аналогічним методом лінеаризації отримана для виразу (5) емпірична залежність

показника степені  $n$  від напруженості електричного поля та температури повітря в сушильній шафі:

$$n = 0,511 + (0,0127 - 0,0003E) \cdot (t_{нов} - 82,2) \quad (6)$$

*Висновки.* 1. Встановлено залежності для розрахунку тривалості електроплазмолізу та зміни електричного опору яблучної сировини на даному періоді із врахуванням режимних параметрів процесу сушіння у визначених діапазонах: температури повітря в сушильній шафі  $25^{\circ}\text{C} < t_{нов} < 55^{\circ}\text{C}$ ; напруженості електричного поля прямого електронагріву  $20\text{В/см} < E < 40\text{В/см}$ .

2. Отримані залежності (4)-(6) можуть стати складовою частиною повного математичного опису комбінованого процесу сушіння яблук, що дає можливість визначати технологічні та енергетичні показники роботи сушильного апарату.

#### **Список використаних джерел:**

1. Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith) / J. Moreno et al. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2013. Vol. 20. P. 198-207. DOI: 10.1016/j.ifset.2013.06.006.

2. Tuoxiu Z., Marybeth L. The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. *Bioresource Technology*. 2003. Vol. 87, № 3. P. 215-220. DOI: 10.1016/S0960-8524(02)00253-5.

3. Electroporation-Assisted Dewatering as an Alternative Method for Drying Plants / M. Sack et al. *Transactions on Plasma Science*. 2008. № 36. P. 88-92.

4. Lebovka N., Shynkaryk M., Vorobiev E. Drying of Potato Tissue Pretreated by Ohmic Heating. *Drying Technology*. 2006. № 24. P. 601-608. DOI:10.1080/07373930600626677.

5. Калафатов Э. Т., Дидович Э. Т., Османов А. Н. Влияние электроплазмоліза на процесс сушки плодов и ягод. *Агропромышленная инженерия*. 2017. № 9. С. 71-79.

6. Флауменбаум Б. Л., Танчев С. С., Гришин М. А. Основы консервирования пищевых продуктов. Москва: Агропромиздат, 1986. 494 с.

7. Жилкин В. М., Грибков А. Н., Муромцев Ю. Л. Оценка результативности процесса подготовки растительных материалов к обезвоживанию. *Вестник ТГТУ*. 2009. №15 (2). С. 410-415.

8. Джаруллаев Д. С., Мустафаева К. К. Способ увеличения выхода сока из облепихи. *Известия вузов*. 2008. № 3. С. 28-29.

9. Михайлова Т. Н. Эффективность электрообработки яблочной стружки для интенсификации прессования для получения сока. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*. 2003. № 1. С. 289–291.

10. Пат. 2194228 РФ, МПК F26B3/347, A23B7/02. Способ сушки и обеззараживания фруктов и ягод / И. М. Чекрыгина, В. Г. Букреев, А. Д. Еремин. № 2000123044/13; заявл. 04.09.2000; опубл. 10.12.2002.

11. Савойський О. Ю., Яковлев В. Ф., Сіренко В. Ф. Дослідження комбінованого процесу сушіння високовологої яблучної сировини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Мелітополь, 2019. Вип 9, т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-33.

12. Савойський О. Ю., Яковлев В. Ф., Сіренко В. Ф. Дослідження величини питомого електричного опору яблучної сировини в процесі сушіння. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки*. Харків, 2019. Вип. 203: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 107-110.

13. Яковлев В. Ф., Савойський О. Ю. Використання прямого електричного нагріву в технологічному процесі комбінованого сушіння фруктів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки*. Харків, 2018. Вип. 195: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 91-96.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПЛАЗМОЛІЗУ ЯБЛУЧНОЇ СИРОВИНИ В ПРОЦЕСІ КОМБІНОВАНОГО СУШІННЯ Савойський О. Ю.**

### *Анотація*

Заготівля сушених овочів і фруктів в обмежених у часі умовах вимагає інтенсифікації технологічних процесів і розробки енергоощадного сушильного обладнання.

Для інтенсифікації процесу зневоднення нами запропоновано комбінований спосіб сушіння плодовоовочевої сировини з використанням прямого електричного нагріву. При нагріванні біологічних об'єктів змінним електричним струмом, одночасно з підвищенням їх температури відбувається явище електроплазмолізу. Механізм даного явища досить складний та до кінця не вивчений, тому потребує подальшого детального дослідження.

Проведено експериментальні дослідження електроплазмолізу високовологої яблучної сировини в процесі комбінованого сушіння. Досліджено вплив температури повітря в сушильній шафі та напруженості електричного поля, підведеного до яблучної сировини, на процес електроплазмолізу.

Встановлено залежності для розрахунку тривалості електроплазмолізу та зміни електричного опору яблучної сировини на даному періоді із врахуванням режимних параметрів процесу сушіння у визначених діапазонах: температури

повітря в сушильній шафі 25-55<sup>0</sup>С та напруженості електричного поля прямого електронагріву 20-40 В/см.

**Ключові слова:** яблучна сировина, комбіноване сушіння, прямий електронагрів, електроплазмоліз, струм, напруга, електричний опір яблук.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗА ЯБЛОЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОЦЕССЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ

Савойский А. Ю.

### *Аннотация*

Заготовка сушеных овощей и фруктов в ограниченных во времени условиях требует интенсификации технологических процессов и разработки энергосберегающего сушильного оборудования.

Для интенсификации процесса обезвоживания нами предложен комбинированный способ сушки плодоовощного сырья с использованием прямого электрического нагрева. При нагревании биологических объектов переменным электрическим током, одновременно с повышением их температуры происходит явление электроплазмолыза. Механизм данного явления достаточно сложный и до конца не изучен, поэтому требует дальнейшего детального исследования.

Проведены экспериментальные исследования электроплазмолыза высоковлажного яблочного сырья в процессе комбинированной сушки. Исследовано влияние температуры воздуха в сушильном шкафу и напряженности электрического поля, подведенного к яблочному сырью, на процесс электроплазмолыза.

Установлены зависимости для расчета продолжительности электроплазмолыза и изменения электрического сопротивления яблочного сырья на данном периоде с учетом режимных параметров процесса сушки в определенных диапазонах: температуры воздуха в сушильном шкафу 25-55<sup>0</sup>С и напряженности электрического поля прямого електронагрєва 20-40 В/см.

**Ключевые слова:** яблочное сырье, комбинированная сушка, прямой електронагрєв, електроплазмоліз, ток, напруга, електрическое сопротивление яблук.

## RESEARCH OF ELECTROPLASMOLYSIS OF APPLE RAW MATERIALS IN THE PROCESS OF COMBINED DRYING

O. Savoiskyi

### *Summary*

Vegetables and fruits are an irreplaceable source of the most important biologically active substances - vitamins, carbohydrates and minerals necessary for normal human life. In the processing and food industries, long-term storage products are produced in dried form. Procurement of dried fruits and vegetables in a time-limited environment requires the intensification of technological processes and the development of energy-saving drying equipment.

To intensify the dehydration process, we have proposed a combined method for drying fruits and vegetables using direct electric heating. When biological objects are heated with an alternating electric current, simultaneously with an increase in their temperature, the phenomenon of electroplasmolysis occurs. This effect is widely used in the technological processes of making concentrated juices, food preservation and as a

method of pretreating raw materials before drying. The mechanism of the phenomenon of electroplasmolysis is rather complex and not fully understood, therefore, requires further research.

Experimental studies of electroplasmolysis of high-moisture apple raw materials in the process of combined drying have been carried out. The influence of the air temperature in the drying oven and the intensity of the electric field supplied to the apple raw material on the process of electroplasmolysis was investigated.

Dependences have been established for calculating the duration of electroplasmolysis and changes in the electrical resistance of apple raw materials for a given period, taking into account the operating parameters of the drying process in certain ranges: the air temperature in the drying cabinet is 25-55<sup>0</sup>C and the electric field strength of direct electric heating is 20-40 V/cm.

The obtained dependencies can become an integral part of a complete mathematical description of the combined process of drying apples, which makes it possible to determine the technological and energy performance of the drying apparatus.

**Key words:** apple raw material, combined drying, direct electric heating, electroplasmolysis, current, voltage, electrical resistance of apples.