



УДК 66.047.41:634.11

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-33

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВИСОКОВОЛОГОЇ ЯБЛУЧНОЇ СИРОВИНИ

Савойський О. Ю., асп.*

<http://orcid.org/0000-0002-6459-4931>

Яковлєв В. Ф., к. т. н.,

<http://orcid.org/0000-0001-5261-4432>

Сіренко В. Ф., к. т. н.

<http://orcid.org/0000-0003-0831-6563>*Сумський національний аграрний університет*

E-mail: o.savoiskyi@gmail.com

Тел. +380976553778

Анотація - Продовольчий ринок України потребує значної кількості овочевої та фруктової продукції у висушеному стані, найчастіше у вигляді напівфабрикатів для тривалого зберігання або готового продукту для споживання. Альтернативою теплового видалення вологи є електротехнології при яких екологічно чиста енергія подається в концентрованому вигляді безпосередньо до об'єктів сушіння.

В Сумському НАУ запропонований комбінований спосіб висушування високовологої нарізаної фруктової та овочевої сировини [10], в якому використовується поверхневий конвективний нагрів в поєднанні з підводом енергії по всьому об'єму при безпосередньому пропусканні електричного струму. На першій стадії сушки яблука мають велику кількість вологи у вільному стані, тому для інтенсифікації процесу доцільно використовувати пропускання електричного струму.

Розроблена експериментальна установка для дослідження процесів комбінованого конвективного та електричного сушіння зразків яблук на першій стадії, що представляє сушильну камеру в якій підтримувалась задана температура повітря із діапазону 25-55⁰С. До висушуваних зразків через гнучкі контакти підводився змінний електричний струм промислової частоти 50 Гц напругою 10-20 В. Через визначені інтервали часу фіксувались: величина струму, маса зразків та їх внутрішня температура. Розрахунковим шляхом були визначений електричний опір та швидкість сушіння об'єктів.

Виміри електричного опору висушуваних зразків яблук показали їх електропровідність до 1/3 від початкової маси. Було встановлено, що внаслідок інтенсивного соковиділення із клітин м'якоті яблука та відповідного зменшення електричного опору рослинного матеріалу в умовах обмеженого відводу водяної пари спостерігається різке зростання величини електричного струму та температури зразків до пікових значень. Водночас збільшувалась і швидкість сушіння до найбільших значень.

Встановлені граничні параметри напруженості до 2-3 В/мм і об'ємної енергонасиченості до 1 Вт/см³ у висушуваному матеріалі при яких температура зразків яблук не перевищує допустимі пікові значення 50-55⁰С.

© Савойський О. Ю., Яковлєв В. Ф., Сіренко В. Ф.

*Науковий керівник – Яковлєв В. Ф., к. т. н., професор



При допустимих діапазонах початкових умов енергопідводу встановлене 2-3-х кратне зменшення тривалості першого етапу висушування порівняно із конвективним нагріванням при однакових температурах теплоносіїв.

Аналіз кривих сушки та зміни швидкості процесу виявив відсутність класичного першого періоду сушки із сталою швидкістю вологовидалення, що потребує подальшого дослідження кінетики сушки при комбінованому енергопідводі.

Отримані результати досліджень можуть стати основою для розробки технологічних процесів періодичної сушки нарізаних яблук в апаратах середньої продуктивності.

Ключові слова: яблучна сировина, комбіноване сушіння, криві сушіння, напруга, провідність, прямий електронагрів.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день в Україні ринок сухофруктів представлений в основному продукцією іноземного виробництва. Причиною цього є дорога собівартість самого процесу сушіння фруктів, яка знаходиться практично на одному рівні із закупівельними цінами імпортованої продукції.

Фрукти як об'єкт сушіння за структурою являє собою капілярно – пористе тіло, що має високий вміст вологи (до 90%), яку необхідно знизити до рівноважної 15-20%. При цьому, основна маса вологи знаходиться в зв'язаному вигляді всередині клітин [1], що ускладнює процес зневоднення.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні існує велика кількість сушарок різної конфігурації та способами підведення тепла до висушуваного матеріалу [2]. Однак, як показує аналіз, більшість з них енергозатратні, дорого коштують, а іноді і малоефективні.

Виходячи із принципу «Більша концентрація енергії – вища ефективність процесів» все частіше розробники обладнання для термічного зневоднення харчової сировини звертаються до електротехнологій [3]: інфрачервоний нагрів, використання акустичних полів та НВЧ. Але найбільш ефективним є прямий електричний нагрів, коли майже 100% електроенергії використовується на нагрівання.

Електричний нагрів опором завдяки простоті надійності, універсальності та невисокій вартості обладнання використовується в багатьох технологіях. Його особливістю є застосування змінного струму. Не зважаючи на деякі недоліки процес електронагріву все більше досліджується [4].

Сьогодні ряд зарубіжних фірм випускають промислові апарати з використанням прямого електронагріву на переробних заводах із виробництва цільних консервованих фруктів, фрукти в соусах, скибочках і кубиках [5].

В довіднику енергоефективності, випущеному за участю Департаменту аналізу енергетики США, зазначено що в дослідах, проведених в університеті штату Луїзіана, зразки солодкої картоплі (батату) оброблялися прямим електричним нагрівом перед сушінням заморожуванням. Це підвищувало ступінь висушування на 25%. Разом з тим зазначено, що на ефективність процесу впливають такі параметри, як частота змінного струму, напруга, температура, до якої нагрівається робоче середовище і її електропровідність [6].

Використання прямого електричного нагріву в процесах сушіння досліджувалось мало [7, 8, 9]. Тому дане дослідження є актуальним.

Формулювання цілей статті. На основі проведених експериментів дослідити вплив основних технологічних параметрів на процес комбінованого (конвективного в поєднанні з прямим електронагрівом) сушіння яблучної сировини.

Основна частина. Дослідження комбінованого конвективного та електричного сушіння зразків яблук проводилися на експериментальній установці, схема якої зображена на рис.1.

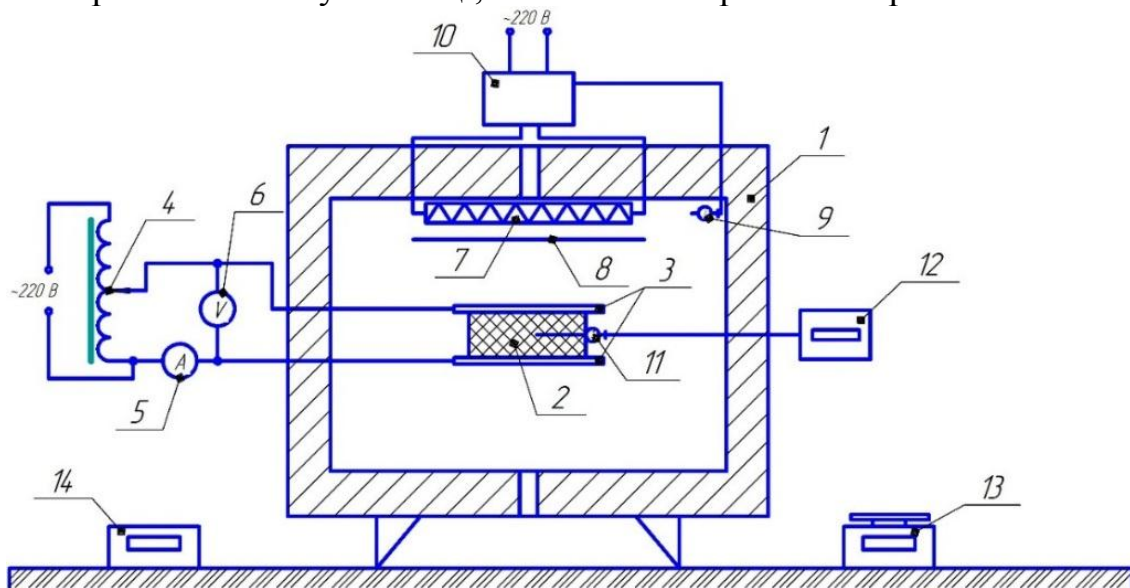


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

1 - сушильна шафа типу СНОЛ-2,5; 2 - досліджуваний зразок; 3 - сітчасті електроди; 4 - лабораторний автотрансформатор ЛАТР-2,25; 5 - лабораторний амперметр Д5070; 6 - лабораторний вольтметр Э541; 7 - ТЕН; 8 - екран; 9, 11 - датчик температури типу ТХА; 10 - блок автоматичного керування температурою в сушильній шафі; 12 - показчик температури DT832; 13 - електронні ваги МН-200; 14 - таймер.



В якості об'єкту досліджень використовувались яблука сортів «Раннє» та «Мантет», нарізаних у вигляді кілець діаметром 30 мм і товщиною 5 мм.

В результаті попередніх експериментів були обрані основні варійовані технологічні параметри, що визначають перебіг процесу комбінованого сушіння зразків яблук:

1) температура всередині сушильної шафи – 25-50°C із кроком 15°C;

2) напруга на електродах – 10, 15, 20 В.

Під час експерименту за показаннями приладів фіксувались:

1) поточний час вимірювань;

2) величина струму в залежності від часу;

3) маса зразків в залежності від часу;

4) температура всередині зразка в залежності від часу.

Часові інтервали призначалися в залежності від тривалості всього процесу сушіння до постійної ваги зразків.

На основі проведених замірів проводилися розрахунки наступних параметрів:

1) зменшення маси зразків на часових інтервалах;

2) швидкості висушування;

3) електричного опору зразків;

4) підведена потужність для нагрівання зразків.

При дослідженні запропонованого методу сушіння керуючими параметрами є температура теплоносія та градієнт напруги по товщині зразка.

Верхня межа температури вибиралася з технологічних регламентів. На основі попередніх досліджень було виявлено, що виходячи із товщини зразків 5 мм, закипання останніх відбувалося при напрузі 25 В. Тому максимальне значення напруги обмежувалося значенням 20 В.

При різних комбінаціях умов процесу, насамперед, визначалось падіння маси зразка переважно через двадцятихвилинні інтервали часу (окрім періоду нагріву, де даний інтервал розбивався на дві частини). Паралельно фіксувалось значення температури всередині зразка і величини електричного струму. Теплова обробка зразків проводилася до досягнення сталої маси. Із отриманого масиву даних (9 режимів) на рисунках 2,а,б та 3,а,б показані типові графічні залежності зміни цих параметрів для двох режимів сушіння.

Розрахункові величини швидкості сушіння та електричного опору представлені на рисунках 2,в та 3,в.

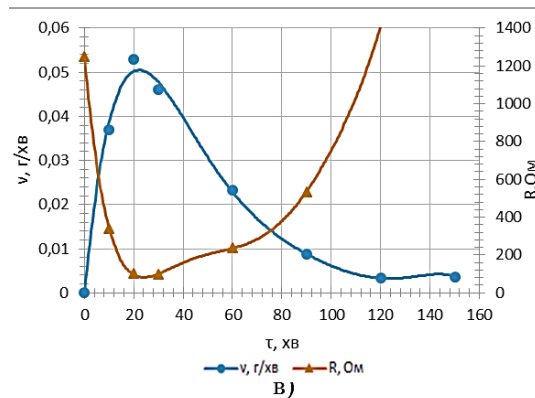
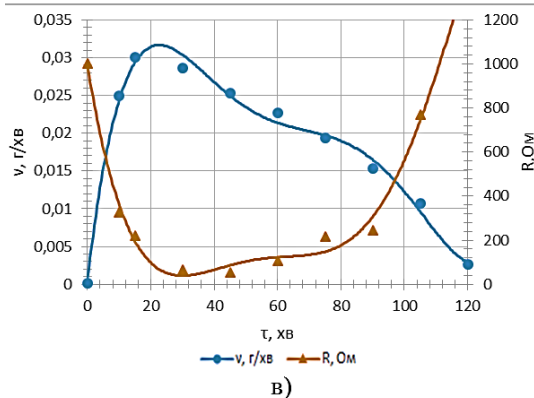
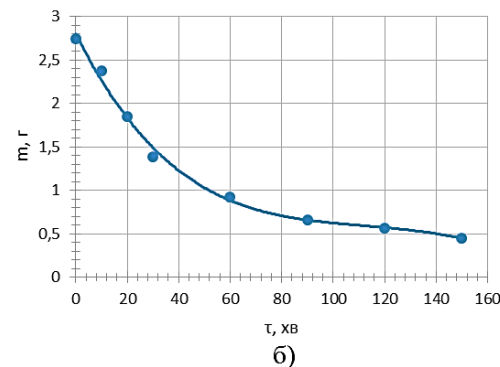
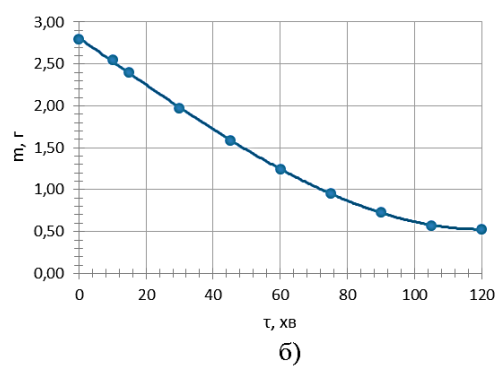
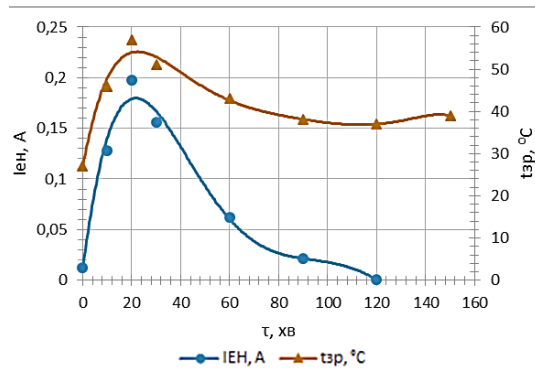
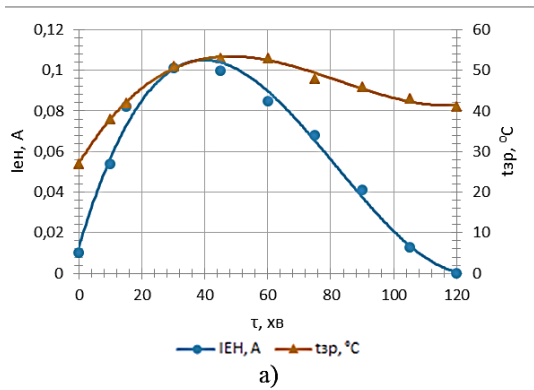


Рис. 2. Залежності параметрів від часу сушіння при $U_{EH}=10$ В та температурі теплоносія 55°C : а) струму прямого електронагріву (I_{EH}) та температури всередині зразка (t_{3p}); б) маси зразка (m); в) швидкості сушіння (v) та електричного опору (R).

Рис. 3. Залежності параметрів від часу сушіння при $U_{EH}=15$ В та температурі теплоносія 40°C : а) струму прямого електронагріву (I_{EH}) та температури всередині зразка (t_{3p}); б) маси зразка (m); в) швидкості сушіння (v) та електричного опору (R).

У всіх проведених експериментах був виявлений характерний хід нагрівання зразка з різким підвищенням струму і температури на першому періоді сушіння (рис. 2,а,б та 3,а,б). Надалі зі зменшенням вологості зразків відбувається падіння величини струму. Водночас зменшення температури всередині зразка відбувається повільніше,

тому що зі зменшенням маси на перший план виходить конвективний теплообмін.

Різка падіння електричного опору (рис. 2,в та 3,в) пояснюється двома факторами: різким виходом клітинного соку і водночас його нагріванням [10].

При конвективному теплопідводі основний процес видалення вільної вологи відбувається під час першого періоду сушіння. Стабільний підвід теплової енергії забезпечує стабільну величину видалення вологи (постійна швидкість сушіння) при сталій температурі зразка з подальшим переходом видалення зв'язаної вологи.

Додатковий прямий електричний нагрів різко змінює протікання процесу зневоднення на першому етапі. В період прогріву швидкість сушіння зростає до пікових величин (рис. 2,в та 3,в), що в декілька разів перевищують значення швидкостей при конвективному сушінні. До моменту закінчення видалення зв'язаної вологи маємо лінійне зменшення швидкості сушіння до значень, характерних для конвективного сушіння. Традиційна ділянка постійної швидкості відсутня.

При одночасному застосуванні прямого електричного і конвективного нагріву спостерігається значне скорочення часу процесу в порівнянні з традиційним конвективним сушінням (табл. 1).

Таблиця 1

Тривалість сушіння в залежності від технологічних параметрів

$t_{\text{пов.}}, ^\circ\text{C}$ $U_{\text{ЕН}}, \text{В}$	25	40	55
0	2 доби	8 год.	4 год.
10	9 год.	5,5 год.	2,5 год.
15	5 год.	3 год.	2 год.
20	2,5 год.	1,5 год.	1,25 год.

Враховуючи вимоги до якості готової продукції, встановлюється верхня межа нагрівання яблучної сировини до $t_{\text{зр max}} = 55-57^\circ\text{C}$. Показані енергетичні залежності (рис. 4 та 5) дають можливість визначити найбільш прийнятні режими сушіння з підводом електричної енергії до $P = 1\text{Вт/см}^3$ при градієнті напруги по товщині шару $U/h = 2-3 \text{ В/мм}$ і відповідних температурах теплоносія.

Так, всі режими, що зображені на рис. 4 та 5 нижче обмежувальної горизонтальної лінії при температурі зразка $t_{\text{зр max}} = 55-57^\circ\text{C}$ є робочими.

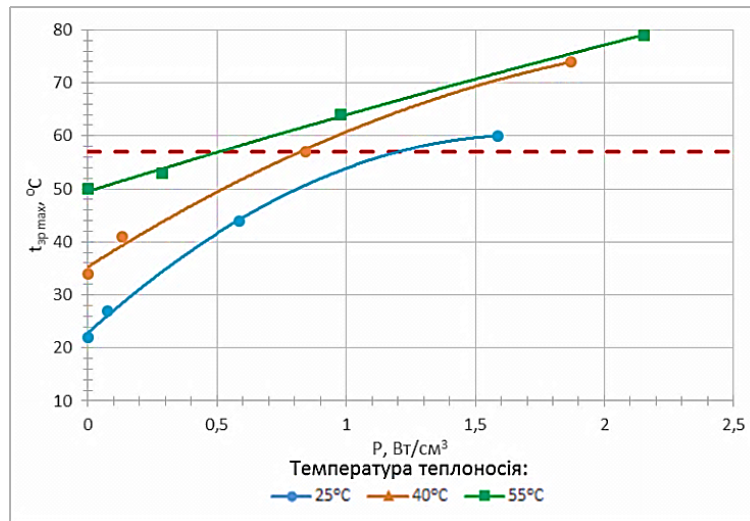


Рис. 4. Залежність максимальної температури зразка від величини підведеної об'ємної електричної потужності при відповідній температурі теплоносія

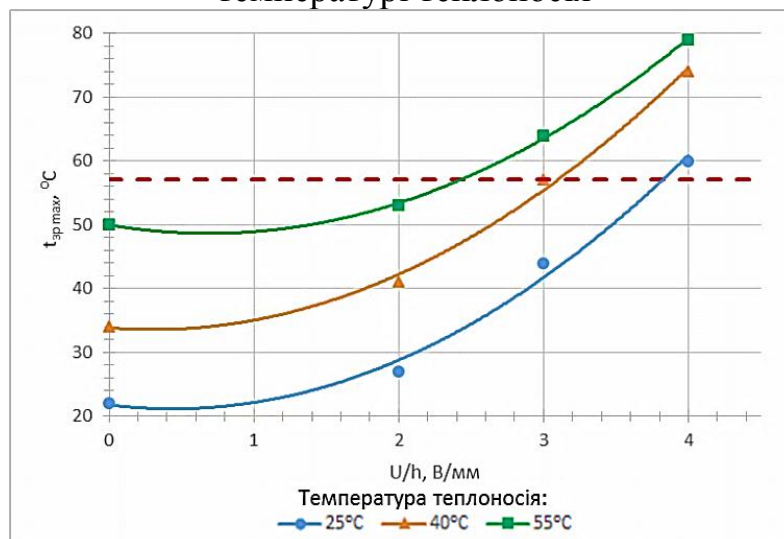


Рис. 5. Залежність максимальної температури зразка від градієнту напруги по товщині шару сировини при відповідній температурі теплоносія

Висновки. 1. Встановлена ефективність комбінованого (конвективний в поєднанні з прямим електронагрівом) способу сушіння яблучної сировини з отриманням продукції заданої якості за час втричі менший в порівнянні лише з конвективним підводом теплової енергії.

2. Виявлене явище зниження електричного опору (рис. 2в та 3в) до мінімальних значень в процесі нагріву зразків яблук електричним струмом при сталій напрузі змінного струму промислової частоти.

3. Визначені граничні режими технологічних параметрів за яких забезпечується належна якість готової продукції.



4. Визначена межа вологості висушеної сировини, що становить 1/3 від початкової маси, до якої можливий прямий електричний нагрів.

5. Встановлені граничні параметри градієнта напруги по товщині шару до 2-3 В/мм і об'ємної енергонасиченості до 1 Вт/см³ у висушеному матеріалі, при яких температура зразків не перевищує допустимі значення 55-57 °С.

6. Отримані експериментальні залежності кінетики сушки є передумовою для складання аналітичного опису процесу з комбінованим нагрівом.

Список використаних джерел

1. *Левина Р. Е.* Морфология и экология плодов. Ленинград: Наука, 1987. 160 с.

2. *Гинзбург А. С.* Сушка пищевых продуктов. Москва: Пищепромиздат, 1960. 680 с.

3. Электротехнология / *В. А. Карасенко и др.* Москва: Колос, 1992. 304 с.

4. *Журавков А.* Аналитический обзор применения омического нагрева в пищевых технологиях. Сайт кафедры электротехники Национального университета пищевых технологий. URL: www.on.co.ua (дата звернення: 13.02.2019).

5. *Суханова Р. С.* Современные промышленные способы очистки картофеля. *Агроголландия*. 1993. № 3. С. 9.

6. Сайт государственного аграрно-культурного центрального университета штата Луизиана, США. URL: <http://www.lsuagcenter.com/> (дата звернення: 13.02.2019).

7. *Яковлев В. Ф., Савойський О. Ю.* 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.

8. А. с. СССР № 124791. Способ сушки тонких волокнистых материалов путем прямого электронагрева / *В. В. Красников, В. А. Данилов*; заявл. 13.01.1959, Бюл. № 23.

9. Спосіб комбінованого сушіння біологічних об'єктів: пат. 127324 Україна: МПК (2018.01) F26B 7/00, F26B 5/0.2 (2006.01). № и 2018 02036; заявл. 27.02.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14.

10. *Родиков С. А.* Методы и устройства анализа зрелости яблок. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 216 с.



ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ВЫСОКОВЛАЖНОГО ЯБЛОЧНОГО СЫРЬЯ

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

Аннотация - Продовольственный рынок Украины нуждается в значительном количестве овощной и фруктовой продукции в высушенном состоянии, чаще всего в виде полуфабрикатов для длительного хранения или готового продукта для потребления. Альтернативой теплового удаления влаги является электротехнологии при которых экологически чистая энергия подается в концентрированном виде непосредственно к объектам сушки.

В Сумском НАУ предложен комбинированный способ высушивания высоковлажного нарезанного фруктового и овощного сырья [10], в котором используется поверхностный конвективный нагрев в сочетании с подводом энергии по всему объему при непосредственном пропускании электрического тока. На первой стадии сушки яблоки имеют большое количество влаги в свободном состоянии, поэтому для интенсификации процесса целесообразно использовать пропускания электрического тока.

Разработанная экспериментальная установка для исследования процессов комбинированной конвективной и электрической сушки образцов яблок, на первой стадии, представляет сушильную камеру в которой поддерживалась заданная температура воздуха с диапазона 25-55⁰С. К высушиваемым образцам через гибкие контакты подводился переменный электрический ток промышленной частоты 50 Гц напряжением 10-20 В. Через определенные интервалы времени фиксировались: величина тока, масса образцов и их внутренняя температура. Расчетным путем были определен электрическое сопротивление и скорость сушки объектов.

Измерения электрического сопротивления высушиваемых образцов яблок показали их электропроводность до 1/3 от первоначальной массы. Было установлено, что вследствие интенсивного соковыделения из клеток мякоти яблока и соответствующего уменьшения сопротивления растительного материала в условиях ограниченного отвода водяных паров наблюдается резкий рост величины электрического тока и температуры образцов к пиковым значениям. В то же время увеличивалось и скорость сушки до наибольших значений.

Установлены предельные параметры напряженности до 2-3 В/мм и объемной энергонасыщенности до 1 Вт/см³ в высушиваемом материале при которых температура образцов яблок не превышает допустимые пиковые значения 50-55⁰С. При допустимых диапазонах начальных условий энергоподвода установлено 2-3-х кратное уменьшение продолжительности первого этапа сушки по сравнению с конвективным нагревом при одинаковых температурах теплоносителей.

Анализ кривых сушки и изменения скорости процесса обнаружил отсутствие классического первого периода сушки с постоянной скоростью влаговыделения, что требует дальнейшего исследования кинетики сушки при комбинированном энергоподводе.

Полученные результаты исследований могут стать основой для разработки технологических процессов периодической сушки нарезанных яблок в аппаратах средней производительности.



Ключевые слова: яблочное сырье, комбинированная сушка, кривые сушки, напряжение, проводимость, прямой электронагрев.

RESEARCH OF THE COMBINED DRYING PROCESS OF APPLE RAW MATERIAL OF HIGH HUMIDITY

A. Savoiskyi, V. Yakovlev, V. Sirenko

Summary. The food market of Ukraine needs a significant amount of vegetable and fruit products in a dried state, most often in the form of semi-finished products for long-term storage or the finished product for consumption (vegetable and fruit chips, snacks, etc.).

The developers of technologies and equipment, first of all, are faced with the task of ensuring the proper quality of products. An alternative to thermal moisture removal is electrical technology in which clean energy is fed in a concentrated form directly to the objects of drying.

In Sumy National Agrarian University proposed a combined method of drying high-moisture sliced fruit and vegetable raw materials [10], which uses surface convective heating in combination with the supply of energy throughout the volume with direct transmission of electric current. At the first stage of drying, apples have a large amount of moisture in a free state, therefore, to intensify the process, it is advisable to use the transmission of electric current.

The developed experimental facility for studying the processes of combined convective and electric drying of apple samples, in the first stage, represents a drying chamber in which the desired air temperature from 25-55 °C was maintained. The dried electric samples were supplied through flexible contacts with an alternating electric current of industrial frequency 50 Hz with a voltage of 10-20 V. At certain time intervals, the current magnitude, the mass of the samples and their internal temperature were recorded. Calculated were a certain electrical resistance and drying rate of objects.

Measurements of the electrical resistance of dried apple samples showed their electrical conductivity up to 1/3 of the original weight. It was found that due to the intense juice production from the apple pulp cells and a corresponding decrease in the resistance of the plant material under conditions of limited removal of water vapor, a sharp increase in the electric current and sample temperature to peak values is observed. At the same time, the drying rate increased to the highest value.

Limit parameters of intensity up to 2-3 V/mm and volumetric energy saturation up to 1 W/cm³ in the dried material were established at which the temperature of apple samples does not exceed the allowable peak values of 50-55 C.

With allowable ranges of initial energy supply conditions, a 2-3-fold reduction in the duration of the first stage of drying was established compared to convective heating at the same temperature of the heat transfer media.

Analysis of the drying curves and changes in the process rate revealed the absence of the classical first drying period with a constant rate of moisture release, which requires further study of the kinetics of drying with a combined energy supply.

The results of research can be the basis for the development of technological processes of periodic drying of sliced apples in the apparatus of average productivity.

Keywords: apple raw materials, combined drying, drying curves, voltage, conductivity, direct electrical heating.