

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

САВОЙСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.365.31: 621.9.048.6:664.854

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС
СУШІННЯ ФРУКТОВОЇ СИРОВИНИ
З ВИКОРИСТАННЯМ ПРЯМОГО ЕЛЕКТРОНАГРІВУ
ТА УЛЬТРАЗВУКУ

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2024

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця

Роботу виконано в Сумському національному аграрному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, професор
ЯКОВЛЄВ Валерій Федорович,
Сумський національний аграрний університет,
професор кафедри енергетики
та електротехнічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ЖИЛЬЦОВ Андрій Володимирович,
Інститут електродинаміки НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу електромагнітних систем

кандидат технічних наук, доцент
ЖИЛА Віктор Іванович,
Державний біотехнологічний університет,
професор кафедри інтегрованих електротехнологій
та енергетичного машинобудування

Захист відбудеться «19» серпня 2024 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «17» липня 2024 року

В. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

Сергій ШВОРОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більшість харчових продуктів рослинного походження містять у складі значну кількість води, яка є необхідною їхньою складовою. Однак надлишок води знижує поживну цінність продовольства, збільшує витрати на транспортування і може викликати псування внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів. З метою запобігання цьому та для тривалого збереження плодоовочевої сировини необхідна спеціальна обробка. Найпоширенішим способом такої обробки є сушіння.

Ринок сухофруктів в Україні представлений в основному продукцією іноземного виробництва. Однією із причин незначної наявності української продукції на ринку є закупівельна ціна, яка практично знаходиться на одному рівні, що й ціни імпортерів. Причину цьому варто шукати у високій собівартість технологічного процесу сушіння фруктів, а точніше у витратах енергоресурсів та низькій енергоефективності методів видалення вологи. Фрукт, як об'єкт сушіння, за структурою є капілярно-пористим тілом з високим вмістом вологи (до 90 %), яку необхідно знизити до рівноважної – 15–20 %. При цьому основна маса вологи знаходиться у зв'язаному вигляді всередині клітин, що ускладнює процес зневоднення.

Сьогодні існує велика кількість сушильних апаратів різної конфігурації та способів підведення тепла до висушуваного матеріалу. Аналіз результатів їхньої роботи показує, що відомі методи часто не задовольняють вимоги якості готового продукту, мають велику вартість обладнання, енергоємні та малоефективні. Тому виконання наукових досліджень, які направлені на створення електротехнологічних комплексів сушіння плодоовочевої сировини є актуальним завданням для переробної галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що склали основу дисертації, виконувалися на кафедрі енергетики та електротехнічних систем Сумського національного аграрного університету за державною програмою «Розробка методів і технічних засобів енергетичного і інформаційного впливу полів різної фізичної природи на сільськогосподарські продукти та матеріали» (номер державної реєстрації 0116U005120, 2018–2020 рр.), у якій автор був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертації – наукове обґрунтування створення електротехнологічного комплексу з підвищеною енергоефективністю для здійснення комбінованого процесу сушіння плодоовочевої продукції з використанням прямого електричного нагріву та попередньої ультразвукової обробки.

Для досягнення мети сформовані такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан проблеми, віднайти та оцінити існуючі способи й технічні системи для попередньої обробки та сушіння фруктової сировини, виявити їхні переваги та недоліки;

– на основі експериментальних досліджень визначити параметри електроакустичної системи із джерелом живлення, що забезпечує допустиму інтенсивність вивільнення рідини з внутрішньоклітинного простору;

- розробити одновимірну математичну модель сушіння, що враховує внутрішні джерела тепла, обумовлені прямим електричним нагрівом фруктових сировини;

- експериментально обґрунтувати й дослідити вплив попередньої ультразвукової обробки та прямого електричного нагріву на зміну питомого опору та величини струму при прямому електричному нагріві для визначення меж регулювання параметрів джерел живлення;

- дослідити зміну мікроструктури висушених зразків фруктів під впливом ультразвуку та прямого електричного нагріву при різних режимах обробки;

- обґрунтувати структуру й технічні рішення електротехнологічного комплексу сушіння фруктових сировини;

- економічно обґрунтувати ефективність використання електротехнологічного комплексу для інтенсифікації процесу сушіння фруктів.

Об'єкт дослідження – процес комбінованого сушіння фруктових сировини з використанням ультразвукової попередньої обробки та прямого електричного нагріву.

Предмет дослідження – закономірності впливу прямого електричного нагріву та ультразвуку на електрофізичні, кінетичні та енергетичні параметри технологічного процесу сушіння фруктових сировини.

Методи дослідження. В основу методів дисертаційного дослідження покладено елементи теорії пружності й теорії коливань, методи теорії звуку, теорії електроакустичних перетворювачів, теорії електромагнітного поля, тепло-й масообміну та статистичної обробки даних з використанням комп'ютерних технологій. Перевірка розроблених теоретичних положень проводилася на основі експериментальних досліджень, під час яких була підтверджена їхня ефективність.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше обґрунтовано структуру електротехнологічного комплексу для здійснення комбінованого процесу зневоднення фруктових сировини, що відрізняється від відомих застосувань прямого електричного нагріву та попередньої обробки ультразвуком, при якому забезпечується зниження енергоємності виробництва із забезпеченням якості готової продукції.

Удосконалено одновимірну математичну модель комбінованого процесу сушіння з використанням прямого електричного нагріву шляхом врахування динаміки зміни питомого електричного опору сировини від температури зразків та їх вологовмісту, що дає змогу визначити вимоги до джерела живлення електротехнологічного комплексу сушіння фруктових сировини.

Уперше на основі експериментальних досліджень визначено параметри електроакустичної системи із джерелом живлення для попередньої обробки сировини, що забезпечило допустиме значення інтенсивності вивільнення рідини з внутрішньоклітинного простору.

Практичне значення одержаних результатів полягає у підтвердженні гіпотези щодо техніко-економічної доцільності використання прямого електричного нагріву та ультразвуку в технологічному процесі сушіння

фруктової сировини, що дозволило інтенсифікувати процес та знизити питомі витрати енергії.

Отримані результати теоретичних й експериментальних досліджень дали змогу розробити електротехнологічний комплекс для інтенсифікації процесу сушіння фруктової сировини й обґрунтувати параметри та режими його роботи.

Промислова апробація електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та ультразвуку проведена у промислових умовах ТОВ «СП «АГРОДІМ» Бахмацького району Чернігівської області та ТОВ «СУМИФІТОФАРМАЦІЯ» м. Суми (акти впровадження наукової розробки від 14.06.2023 р.).

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі енергетики та електротехнічних систем Сумського національного аграрного університету та використовуються під час розроблення силабусів та навчально-методичних видань для викладання дисциплін «Електротехнології та електроосвітлення», «Електротехнології в АПК» і «Моделювання теплових і гідродинамічних процесів», а також при виконанні магістерських робіт, курсових і дипломних проєктів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (акт впровадження наукової розробки від 25.05.2023 р.).

Спосіб комбінованого сушіння біологічних об'єктів з використанням прямого електричного нагріву та ультразвуку захищено патентом України № 127324UA на корисну модель.

Особистий внесок здобувача у розв'язанні конкретного наукового завдання. Основні теоретичні, експериментальні дослідження та розрахунки за темою дисертації автором виконано самостійно. Підготовлено матеріали досліджень до публікації, організовано промислову апробацію розробленої технології. Автору належать основні ідеї в опублікованих працях, отриманому патенті на корисну модель. Виконано критичний аналіз та узагальнення результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях викладачів та аспірантів Сумського національного аграрного університету (м. Суми, 2016–2023 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технології XXI сторіччя» (м. Суми, 2016–2022 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2016, 2018, 2019 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті І. І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів» (м. Мелітополь (м. Запоріжжя), 2017, 2019 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики і автоматики в системі природо-користуванні» (м. Київ, 2018 р.); XX Міжнародній науковій конференції, присвяченій 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (м. Миколаїв, 2019 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів» (м. Умань, 2020 р.); Всеукраїнській науково-практичній

інтернет-конференції пам'яті В. В. Овчарова «Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем» (м. Мелітополь, 2020–2021 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (м. Харків, 2020 р); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Сучасні проблеми інноваційного розвитку електричної інженерії» (м. Мелітополь, 2021 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (м. Мелітополь, 2020–2022 рр.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень опубліковано у 24 наукових працях, з яких 7 статей у наукових фахових виданнях України, 3 статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, 2 статті у наукових виданнях інших держав, 11 тез наукових доповідей, патент України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 236 сторінок, у тому числі 16 додатків. Основна частина містить 56 рисунків і 4 таблиці. Список використаних літературних джерел складається зі 118 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та завдання наукового дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та апробацію результатів досліджень, публікації та впровадження.

У першому розділі «**Стан питання та постановка задач досліджень**» наведено характеристику плодів насіннячкових фруктів як об'єктів сушіння, зазначено літературні дані про сучасний стан та основні напрями вдосконалення способів інтенсифікації процесу зневоднення фруктів. Виконано глибокий аналіз наявних методів і пристроїв для попередньої обробки та сушіння фруктової сировини, наведено їхню класифікацію. Відмічено низьку ефективність й обґрунтовано необхідність застосування електротехнологічного комплексу для здійснення комбінованого процесу зневоднення фруктової сировини, що відрізняється від відомих застосувань прямого електричного нагріву та попередньої обробки ультразвуком, що забезпечує зниження енергоемності виробництва та збереження встановленої якості готової продукції.

У другому розділі «**Теоретичне обґрунтування параметрів електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини**» для забезпечення якісного та енергоефективного сушіння розроблено електротехнологічний комплекс комбінованого сушіння, який передбачає застосування попередньої ультразвукової обробки та прямого електронагріву в процесі конвективного зневоднення сировини.

Запропонований електротехнологічний комплекс, структурна схема якого показана на рис. 1., включає в себе панель керування, блок попередньої

ультразвукової обробки сировини та блок комбінованого конвективного сушіння з використанням прямого електронагріву.

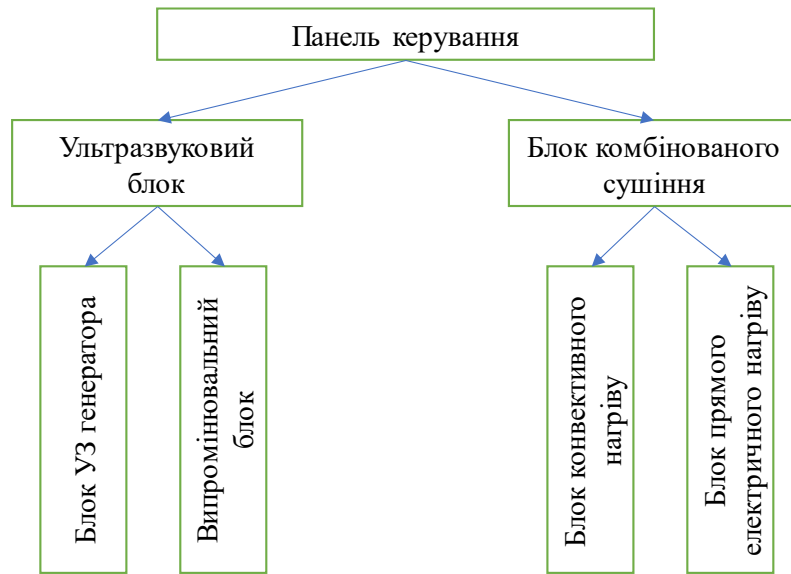


Рис. 1. Структурна схема електротехнологічного комплексу

Для обґрунтування параметрів джерела живлення блоку попередньої ультразвукової обробки сировини розроблено фізичну модель та структурну схему електроакустичної системи, що включає генератор електричних коливань ультразвукової частоти, електроакустичний перетворювач та камеру для попередньої обробки (рис. 2).

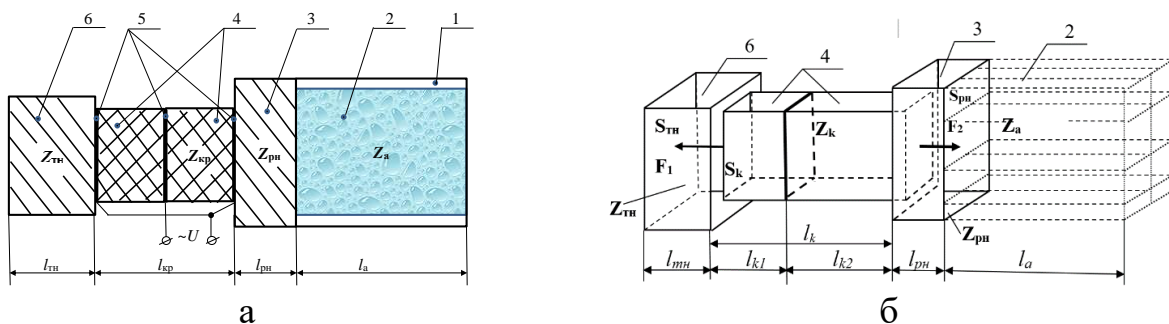


Рис. 2. Електроакустична система для ультразвукової обробки фруктової сировини: а – фізична модель; б – структурна схема фізичної моделі; 1 – камера для обробки; 2 – оброблювана суміш; 3 – робоча накладка; 4 – п'єзокерамічні елементи (хвилевод); 5 – електроди для живлення електроакустичного перетворювача; 6 – тильна накладка-демпфер

Для отримання режиму кавітації параметри ультразвукового поля, зокрема інтенсивність та частота, повинні відповідати певним значенням. Встановлено, що найбільша ефективність кавітації спостерігається в частотному діапазоні від 20 до 200 кГц. На практиці найчастіше використовують частоти від 20 до 44 кГц, що пов'язано з технічними можливостями. У цьому діапазоні частот для отримання ультразвукового поля доцільно використовувати п'єзокерамічні

перетворювачі. Величина інтенсивності ультразвуку для створення режиму кавітації у згаданому діапазоні частот повинна бути в межах від 1 до 5 Вт/см².

Аналіз роботи електроакустичної системи будемо вести на підставі еквівалентної схеми заміщення (рис. 3). Для розрахунку акустичних опорів еквівалентної схеми заміщення, приведених до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача, визначено відповідні входні опори елементів електроакустичної системи.

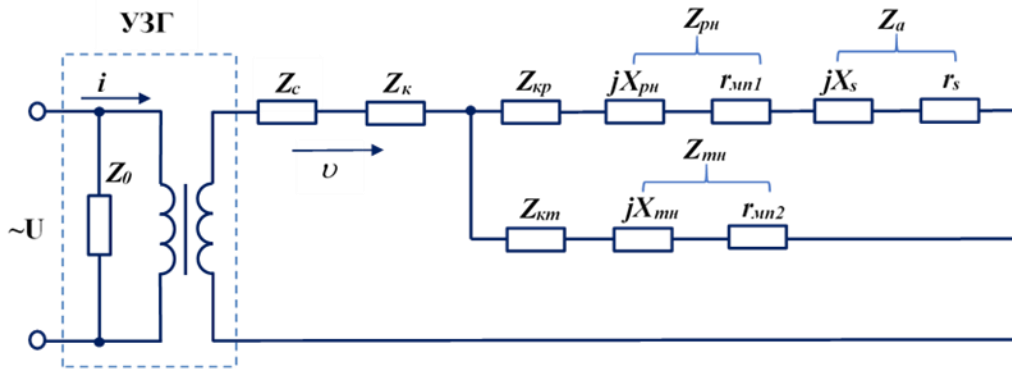


Рис. 3. Електрична еквівалентна схема електроакустичної системи для ультразвукової обробки фруктів: УЗГ – ультразвуковий генератор; Z_c – приведений ємнісний опір стрижня при повздовжньому п'єзоєфекті; Z_k – опір загальної ділянки п'єзокерамічного стрижня; $Z_{kp}=Z_{km}$ – відповідно опори робочої та тильної ділянок п'єзокерамічного стрижня (до вузлового перерізу); Z_{pn} , Z_{mn} – відповідно опори робочої та тильної накладок; Z_a – опір навантаження (оброблюваної рідини); r_{mn1} , r_{mn2} – опори механічних втрат перетворювача

Опір навантаження Z_a , приведений до вхідного опору робочої (зі сторони оброблюваної рідини) поверхні накладки визначається з урахуванням поглинання енергії випромінювання в оброблюваній рідині, тобто вводом у розрахунковий вираз комплексного хвильового числа v_a .

Оскільки $Z_a = R_s + jX_s$, то:

$$Z_a = \frac{R_s(1 + \operatorname{tg}(v_a l_a)) + jX_s \left(1 - \frac{R_s^2}{X_s^2}\right) \operatorname{tg}(v_a l_a)}{1 + \left(1 - \frac{R_s}{X_s}\right)^2 \operatorname{tg}^2(v_a l_a)}, \quad (1)$$

де R_s , X_s – відповідно активна та реактивна складові опору оброблюваної речовини, кг/с; v_a – комплексне хвильове число, рад/м; l_a – висота шару оброблюваної сировини, м.

Враховуючи, що хвильові розміри випромінювальної поверхні набагато більше довжини хвилі випромінювальних коливань, вхідний опір навантаження, приведений до внутрішньої поверхні робочої накладки, тобто, до вхідної поверхні п'єзоелемента:

$$Z_{npn} = r_{pmn1} + \frac{R_s}{\cos^2(k_{pn}l_{pn})} - jX_{pn} \operatorname{tg}(k_{pn}l_{pn}), \quad (2)$$

де r_{pmn1} – опір втрат у робочій гілці перетворювача, кг/с; X_{pn} – реактивний опір робочої накладки, кг/с; k_{pn} – хвильове число матеріалу робочої накладки, рад/м; l_{pn} – висота робочої накладки, м.

Опір частини п'єзокерамічного перетворювача (до вузлової точки):

$$Z_{kp} = -jX_{kp} \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp}l_{kp}}{2}\right), \quad (3)$$

де X_{kp} – реактивна складова опору частини п'єзокерамічного перетворювача (до вузлової точки), кг/с; k_{kp} – хвильове число матеріалу п'єзоелементу, рад/м; l_{kp} – довжина частини п'єзоелементу (до вузлової точки), м.

Опір навантаження, приведений до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача в колі робочої накладки:

$$Z_1 = Z_{npn} + Z_{kp} = \frac{R_s + r_{pmn1} \cos^2(k_{pn}l_{pn})}{\cos^2(k_{pn}l_{pn})} - jX_{kp} \left(\frac{X_{pn}}{X_{kp}} \operatorname{tg}(k_{pn}l_{pn}) + \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp}l_{kp}}{2}\right) \right), \quad (4)$$

За аналогією опір кола тильної (неробочої) накладки, приведений до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача, буде дорівнювати:

$$Z_2 = Z_{mn} + Z_{kp} = r_{pmn2} - jX_{kp} \left(\frac{X_{mn}}{X_{kp}} \operatorname{tg}(k_{mn}l_{mn}) + \operatorname{tg}\left(\frac{k_{kp}l_{kp}}{2}\right) \right), \quad (5)$$

де Z_{mn} – опір тильної (неробочої) накладки перетворювача, кг/с; r_{pmn2} – опір втрат у неробочій гілці перетворювача, кг/с; k_{mn} – хвильове число матеріалу тильної накладки, рад/м; l_{mn} – довжина тильної накладки, м; X_{mn} – реактивна складова опору тильної накладки, кг/с.

Сумарний опір паралельних кіл, приведений до вузлової точки п'єзокерамічного випромінювача:

$$Z_{12} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (6)$$

Повний опір механічної сторони електроакустичного перетворювача:

$$Z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = Z_c + Z_k + Z_{12} = R_{12} + j(X_k - X_{12} - X_c), \quad (7)$$

де X_k – опір загальної ділянки п'єзокерамічного стрижня, кг/с; X_c – ємнісний опір стрижня при повздовжньому п'єзоефекті, кг/с.

При висоті навантаження (оброблюваної речовини) 0,2 м та змінній частоті точне значення акустичних опорів навантаження складає величину, що лежить у межах від 230 до 420 кг/с (рис. 4). Аналіз формули (7) показує (рис. 5), що мінімальне значення акустичного опору механічної сторони п'єзоперетворювача відповідає частоті близько 21,6 кГц.

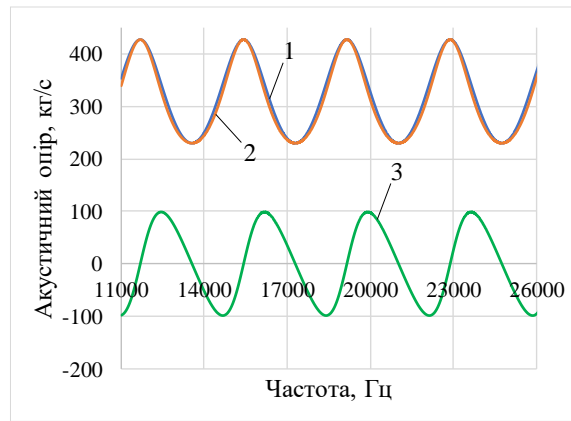


Рис. 4. Залежності вхідних акустичних опорів поглинаючого шару оброблюваної речовини від частоти ультразвуку: 1 – повний опір; 2 – активний опір; 3 – реактивний опір

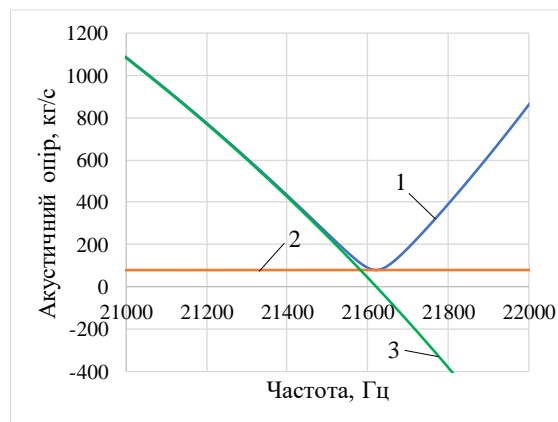


Рис. 5. Залежності загального акустичного опору механічної сторони п'єзоперетворювача від частоти ультразвуку: 1 – повний опір; 2 – активний опір; 3 – реактивний опір

Для вирішення задачі обґрунтування оптимальної частоти та забезпечення максимальної потужності ультразвукового поля побудовано залежності сили (рис. 6) та потужності від частоти ультразвукових коливань (рис. 7).

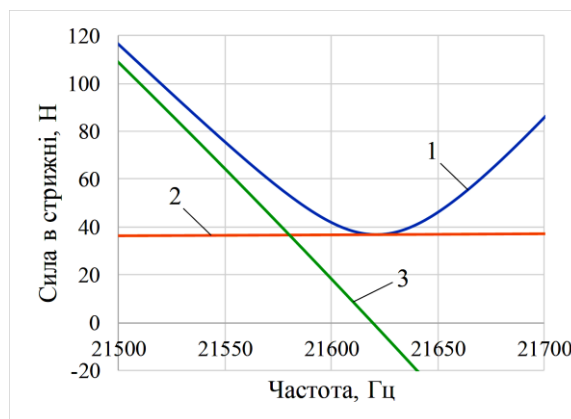


Рис. 6. Залежності сили в стрижні п'єзокерамічного випромінювача від частоти при інтенсивності ультразвуку в оброблюваній речовині 1 Вт/см^2 : 1 – повна сила; 2 – активна сила; 3 – реактивна сила

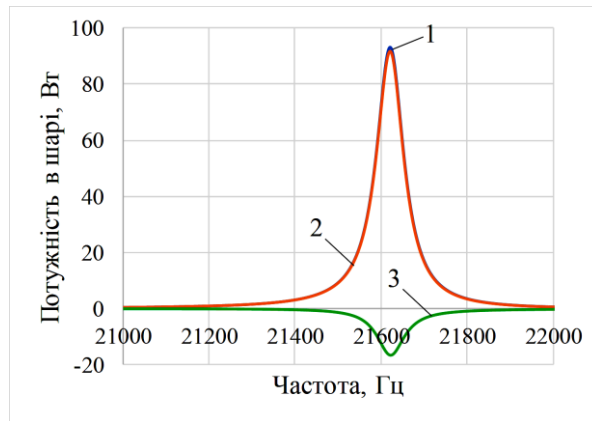


Рис. 7. Залежності потужності в шарі оброблюваної речовини від частоти ультразвуку при силі в стрижні п'єзокерамічного випромінювача 36,8 Н: 1 – повна потужність; 2 – активна потужність; 3 – реактивна потужність

Як видно з рис. 6, максимальна сила в стрижні відповідає частоті 21,62 кГц, яка й буде найбільш оптимальною для створення максимального значення активної енергії, що виділятиметься в шарі оброблюваної речовини. Мінімальна повна сила на позначці 36,8 Н відповідає частоті механічного резонансу електроакустичної системи для обробки фруктів. Залежності потужності від частоти (див. рис. 7) підтвердили, що максимальна потужність відповідає частоті 21,62 кГц. Для забезпечення обробки фруктової сировини перед сушінням отримані теоретичні результати надають можливість визначити електричні характеристики джерела живлення блоку попередньої ультразвукової обробки та розрахунку електроакустичного п'єзокерамічного перетворювача.

Для визначення вимог до джерела живлення блоку комбінованого сушіння з використанням прямого електричного нагріву в роботі вдосконалено одновимірну математичну модель процесу зневоднення шляхом врахування динаміки зміни питомого електричного опору сировини від температури зразків та їх вологовмісту.

У задачі розглядається процес сушіння одношарової безкінечної термічно тонкої плоскої пластини товщиною l із внутрішнім джерелом тепла, обумовленим прямим електричним нагрівом сировини. Нагрів пластини здійснюється як за рахунок конвективного теплопідводу від повітря q_a , так і за рахунок внутрішнього виділення джоулевого тепла q_e , зумовленого пропусканням через вологий матеріал електричного змінного струму промислової частоти (рис. 8).

Сушіння запропонованим комбінованим методом можна розділити на два основні періоди: період зростаючої та період падаючої швидкості сушіння. Характерний для конвективного процесу зневоднення період постійної швидкості відсутній.

Диференційне рівняння масового потоку на основі закону Дальтона:

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = S \cdot (6,36 + 4,83\nu)(8,8067e^{0,0459t_{sp}} - p_{парц}) \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

де m – маса видаленої вологи, кг; S – площа поверхні випаровування, м²; v – швидкість повітря в сушильній камері, м/с; t_{zp} – температура висушуваних зразків, °С; $p_{парц}$ – парціальний тиск водяних парів у сушильному агенті, мм. рт. ст.; τ – час, с.

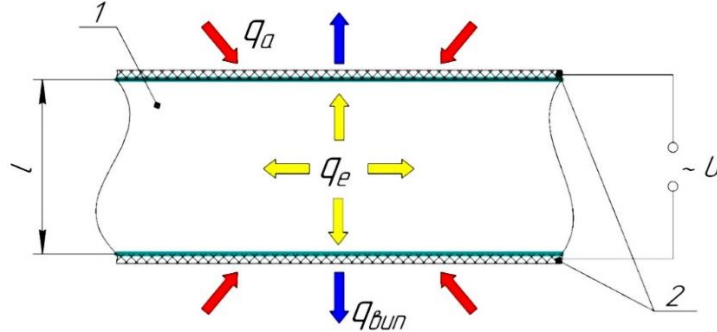


Рис. 8. Розрахункова схема процесу сушіння плоскої пластини при комбінованому підводі тепла: 1 – пластинка, що висушується; 2 – сітчасті електроди для прямого електронагріву; q_e – тепловий потік, виділений при пропусканні струму (джоулеве тепло); q_a – тепловий потік від нагрітого повітря; $q_{вип}$ – тепловий потік із випаруваною вологою

Зміну температури висушуваного зразка знаходимо з виразу теплового балансу:

$$\frac{\partial t_{zp}}{\partial \tau} = \frac{q_a - q_{вип} + q_e}{C_{соку} M_{пот}^{гол} + C_{сyx} M_{сyx}}, \quad (9)$$

де q_a – тепловий потік від нагрітого повітря, Вт; $q_{вип}$ – тепловий потік із випаровуванням вологи, Вт; q_e – тепловий потік від прямого електронагріву, Вт; $C_{соку}$ – питома теплоємність соку (вологи), Дж/(кг·°С); $C_{сyx}$ – питома теплоємність сухих нерозчинних та розчинних мінеральних речовин у зразку, Дж/(кг·°С); $M_{пот}^{гол}$ – поточна маса вологи в зразку, кг; $M_{сyx}$ – маса сухих нерозчинних мінеральних речовин у зразку, кг.

Тепловий потік від нагрітого повітря:

$$q_a = \alpha S (t_{нов} - t_{zp}) = \frac{0,66v^{0,5} \lambda}{D^{0,5} \nu^{0,5}} S (t_{нов} - t_{zp}), \quad (10)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С); ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с; D – діаметр зразка, м; $t_{нов}$ – температура повітря в сушильній шафі, °С.

Тепловий потік із випаруваною вологою:

$$q_{вип} = r \cdot S \cdot (6,36 + 4,83v)(8,8067e^{0,0459t_{zp}} - p_{парц}) \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

де r – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Кількість підведеної теплової енергії при прямому електронагріві, насамперед, залежить від значення електричного опору сировини:

$$q_e = \frac{U^2}{R}, \quad (12)$$

де U – напруга на електродах, В; R – електричний опір пластини, Ом.

На початку процесу сушіння, при нагріванні матеріалу прямим електричним нагрівом має місце явище електроплазмолізу, яке характеризується постійним збільшенням сили електричного струму через об'єкт. У результаті збільшується кількість теплоти, яка виділяється всередині пластини та спостерігається період постійного збільшення швидкості видалення вологи з матеріалу.

Залежності зміни опору фруктової сировини в період електроплазмолізу (період зростаючої швидкості сушіння) можна описати рівняннями типу:

$$\frac{\partial R}{\partial \tau} = R_0 \cdot \tau^{-n}, \quad (13)$$

де R_0 – початкове значення електричного опору сировини, Ом; n – показник степені, що залежить від напруги на електродах та температури повітря в сушильній шафі.

Після проходження стадії електроплазмолізу об'єкт сушіння наближається до моделі капілярно-пористого тіла із нерозчинним каркасом, насиченим електропровідним соком.

Динаміка зміни електричного опору сировини від температури зразків та їх вологовмісту з урахуванням усадки в процесі зневоднення для періоду падаючої швидкості описується рівнянням:

$$R = \frac{1 + 9 \left(\frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{поч}}^{\text{зр}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} \right)^3}{\left(1 - 0,8 \frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{поч}}^{\text{зр}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} \right)^2 \cdot [1 + \alpha' (t_{\text{зр}} - 25) + \beta' (t_{\text{зр}} - 25)^2]} \times \frac{\gamma l_{\text{абс.сух}}^2 \left(1 + \beta_l \frac{m}{M_{\text{сух}}} \right)^2}{(M_{\text{поч}}^{\text{вол}} - m) \left[1,75 \frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{поч}}^{\text{зр}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} + 0,18 \left(\frac{M_{\text{сух}}^{\text{розч}}}{M_{\text{поч}}^{\text{зр}} - m - M_{\text{сух}} + M_{\text{сух}}^{\text{розч}}} \right)^{0,5} \right]} \quad (14)$$

де $M_{\text{поч}}^{\text{зр}}$ – початкова маса зразка, кг; $M_{\text{сух}}^{\text{розч}}$ – маса сухих розчинних речовин, кг;

$l_{\text{абс.сух}}$ – висота абсолютно сухого зразка, м; β_l – лінійний коефіцієнт усадки;

γ – густина, кг/м³; α' , β' – емпіричні коефіцієнти.

На основі аналізу літературних джерел для уникнення перегріву зразків необхідно забезпечити певну напруженість електричного поля в об'ємі сировини. Тому напругу, що прикладена до електродів, доцільно виразити через усереднену напруженість електричного поля в задачі, яка розглядається в роботі:

$$U = E \cdot l, \quad (15)$$

де E – усереднена напруженість електричного поля, В/м.

З урахуванням виразів (8)–(15) отримано системи рівнянь тепло- та масопереносу процесу комбінованого сушіння з використанням прямого електричного нагріву, яка враховує динаміку зміни питомого електричного опору сировини від температури зразків та їх вологовмісту:

– для періоду зростаючої швидкості сушіння:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial m}{\partial \tau} = S \cdot (6,36 + 4,83\nu)(8,8067e^{0,0459t_{zp}} - p_{напу}) \cdot 10^{-6}; \\ \frac{\partial t_{zp}}{\partial \tau} = \frac{1}{C_{соку}(M_{поч}^{гол} - m) + C_{сух}M_{сух}} \left\{ \begin{array}{l} [K(t_{нос} - t_{zp})] + \left[\frac{E^2 l^2}{R_0 \tau^{-n}} \right] - \\ - [(E + F\nu)(8,8067e^{0,0459t_{zp}} - p_{напу}) \cdot 10^{-6}] \end{array} \right\}; \end{array} \right. \quad (16)$$

– для періоду падаючої швидкості сушіння:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial m}{\partial \tau} = S \cdot (6,36 + 4,83\nu)(8,8067e^{0,459t_{zp}} - p_{напу}) \cdot 10^{-6}; \\ \frac{\partial t_{zp}}{\partial \tau} = \frac{1}{C_{соку}(M_{поч}^{гол} - m) + C_{сух}M_{сух}} + \left\{ \begin{array}{l} \left[K(t_{нос} - t_{zp}) \right] - [(E + F\nu)(8,8067e^{0,459t_{zp}} - p_{напу}) \cdot 10^{-6}] + \\ \frac{E^2 l^2 \left(1 - 0,8 \frac{A}{B - m} \right)^2 \cdot [1 + \alpha'(t_{zp} - 25) + \beta'(t_{zp} - 25)^2]}{1 + 9 \left(\frac{A}{B - m} \right)^3} \times \\ \times \frac{(M_{поч}^{гол} - m) \left[\alpha \frac{A}{B - m} + \beta \left(\frac{A}{B - m} \right)^{0,5} \right]}{G \left(1 + \beta_l \frac{m}{M_{сух}} \right)^2} \end{array} \right\}; \end{array} \right. \quad (17)$$

де А, В, Е, F, G, К – константи.

Отримані системи рівнянь (16) та (17), доповнені початковими умовами, підлягають розв'язку числовим методом Рунге-Кутти четвертого порядку. У результаті розв'язання початкової задачі визначено динаміку зміни вологовмісту та температури сировини, що дало змогу визначити енергетичні та кінетичні характеристики технологічного процесу комбінованого сушіння та встановити вимоги до джерела живлення електротехнологічного комплексу.

На рис. 9–12 наведено результати чисельних розрахунків щодо визначення тривалості сушіння, питомих витрат енергії на здійснення прямого електронагріву, максимального струму прямого електричного нагріву та максимальної температури зразків при різній напруженості електричного поля та температурі повітря в сушильній шафі. Адекватність математичного моделювання комбінованого процесу сушіння підтверджено зіставленням результатів чисельних розрахунків та експериментальних досліджень.

На основі отриманих залежностей встановлено, що комбіноване сушіння фруктової сировини з використанням прямого електричного нагріву слід здійснювати при таких параметрах: усереднена напруженість електричного поля – 30 В/см, температура теплоносія в сушильній шафі – 40 °С, швидкість

руху теплоносія – 0,4 м/с. При вказаних параметрах температура сировини в процесі комбінованого сушіння не перевищує 60 °С, а тривалість зневоднення складає 140 хв, що на 70,5 % менше порівняно з конвективним сушінням за аналогічної температури теплоносія. Питомі витрати енергії на прямий електронагрів для вказаного режиму знаходяться в межах 2300 кДж/кг.

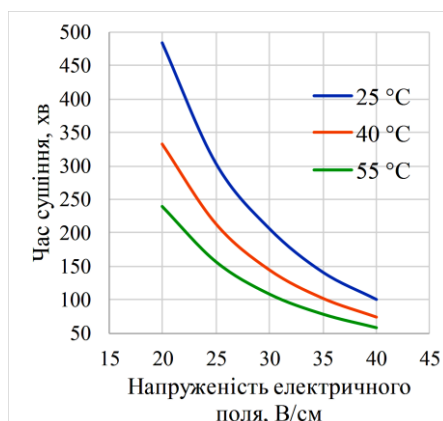


Рис. 9. Залежності часу сушіння від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агенту 25–55 °С

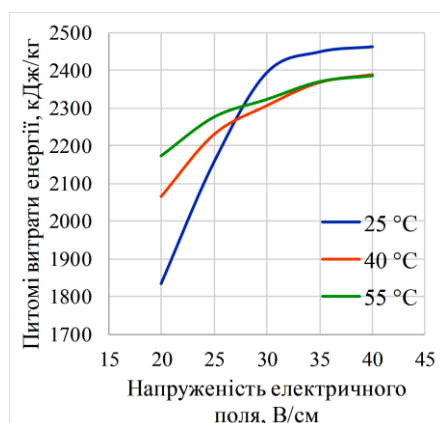


Рис. 10. Залежності питомих витрат енергії від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агенту 25–55 °С

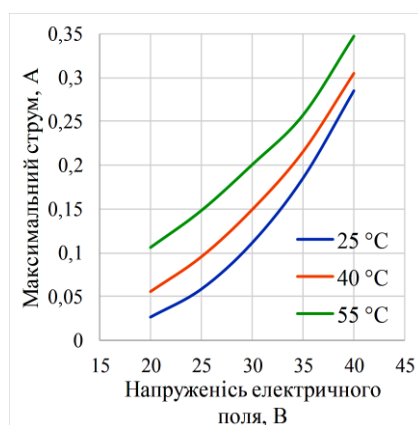


Рис. 11. Залежності максимального струму прямого електронагріву від усередненої напруженості поля при температурі сушильного агенту 25–55 °С

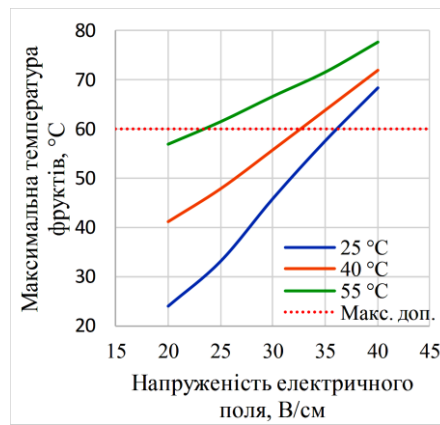


Рис. 12. Залежності максимальної температури зразків від усередненої напруженості електричного поля при температурі сушильного агента 25–55 °C

У третьому розділі «Експериментальні дослідження процесу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та попередньої ультразвукової обробки» програмою проведення експериментів передбачалося: дослідження впливу попередньої ультразвукової обробки та прямого електричного нагріву на зміну електрофізичних та кінетичних характеристик процесу комбінованого сушіння для визначення меж регулювання параметрів джерел живлення; дослідження зміни мікроструктури висушених зразків фруктів під впливом ультразвуку та прямого електричного нагріву при різних режимах обробки методами растрової електронної мікроскопії.

Дослідження впливу прямого електронагріву на процес комбінованого сушіння фруктів здійснювалися у розробленій експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 13.

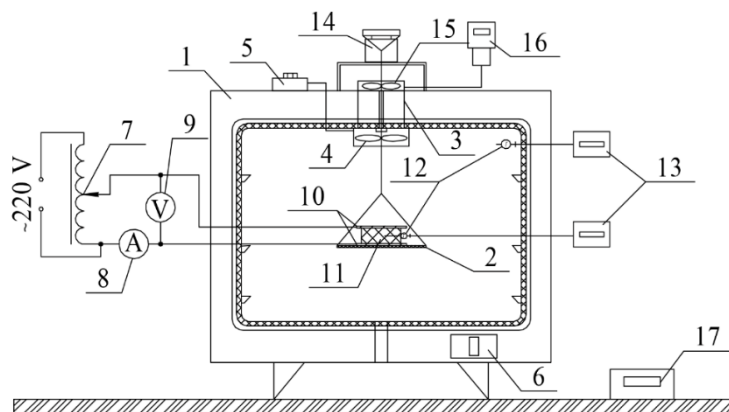


Рис. 13. Схема експериментальної установки: 1 – сушильна шафа конвективного типу; 2 – сітчастий піддон; 3 – вентиляційні канали; 4 – вентилятор; 5 – блок керування обертами вентилятора; 6 – блок керування температурою повітря в шафі; 7 – лабораторний автотрансформатор; 8 – лабораторний міліамперметр; 9 – лабораторний вольтметр; 10 – сітчасті електроди для прямого електронагріву; 11 – досліджуваний зразок; 12 – термопари; 13 – показчики температури; 14 – електронні ваги; 15 – крильчатка анемометра; 16 – анемометр; 17 – таймер

Сушіння відбувалося в шафі типу СНОЛ-2,5. Додатковий прямий електронагрів здійснювався за допомогою системи сітчастих електродів. В якості джерела живлення прямого електронагріву було використано автотрансформатор ЛАТР-2,5. Дослідження впливу ультразвукової (УЗ) обробки сировини перед сушінням було здійснено в ультразвуковій ванні з такими параметрами: вихідна потужність генератора 50 Вт; інтенсивність ультразвукових коливань 1 Вт/см^2 ; частота ультразвуку 22 кГц.

Висушену продукцію високої якості отримують із плодів, що мають щільну структуру м'якоти. Тому в якості сировини для досліджень було обрано плоди яблук ранньолітнього та літнього терміну дозрівання сортів «Раннє» («Ред Мак»), «Мантет» та «Геліос».

Методика експериментальних досліджень процесу комбінованого сушіння фруктів полягала в тому, що попередньо підготовлені яблука нарізали дисками висотою 0,005 м та діаметром 0,028 м. Зразки встановлювалися між сітчастими електродами та поміщалися всередину сушильної шафи на сітчастий піддон, підвішений до чутливого елементу електронних ваг. Надалі через ЛАТР на електроди подавалася напруга відповідного значення частотою 50 Гц. Експерименти проводилися при заданих температурних режимах у сушильній шафі 25–55 °С та напруженістю електричного поля 20–40 В/см. Через визначені проміжки часу проводили такі вимірювання: маси зразка; температури всередині зразка; величини струму, що протікає через зразок.

Методика проведення ультразвукової обробки зразків перед сушінням мала визначені етапи. Попередньо нарізані яблука після зважування та вимірювання електричного опору занурювали в ємність ультразвукової ванни, яка була заповнена водою до встановленого рівня. Після цього їх обробляли ультразвуком протягом 5 хв, 10 та 20 хв. Надалі зразки діставали з УЗ ванни та поміщали на сітчастий піддон для стікання води. Потім повторно зважували та проводили їх сушіння різними способами за методикою, наведеною вище. Отримані масиви даних експортували до редактора таблиць Excel, де проводили розрахунок витрат енергії, значення електричного опору фруктів, вологовмісту та швидкості сушіння зразків.

Основним параметром, що визначає якість готової продукції та кількість витраченої енергії на випаровування вологи при сушінні в запропонованому електротехнологічному комплексі, є величина сили електричного струму, що проходить через висушуваний матеріал. Часові залежності сили струму прямого електронагріву в процесі сушіння показано на рис. 14. Для зручності порівняння разом з експериментальними даними (Е) на графіках нанесені результати теоретичного розрахунку (Т) за математичною моделлю, наведеною в розділі 2 дисертації.

Максимальне значення струму, що проходить через зразок, збільшується з підвищенням напруженості електричного поля та температури повітря в сушильній шафі. При температурі теплоносія 25 °С та відповідній напруженості електричного поля максимальні значення струму були на рівні 0,025–0,262 А, при 40 та 55 °С – 0,056–0,291 та 0,101–0,322 А відповідно. Встановлено, що зі зростанням температури в сушильній шафі, різниця

між піковими значеннями максимальних струмів, при підвищенні напруженості електричного поля, зменшується. При температурі повітря 25 °С зі збільшенням градієнта напруги на електродах максимальні значення струму виросли в 11,5 раза, а при 40 та 55 °С – у 4,8 та 3 рази відповідно. Встановлено, що на пікові величини сили струму припадають максимальні значення швидкості видалення вологи та температури зразка.

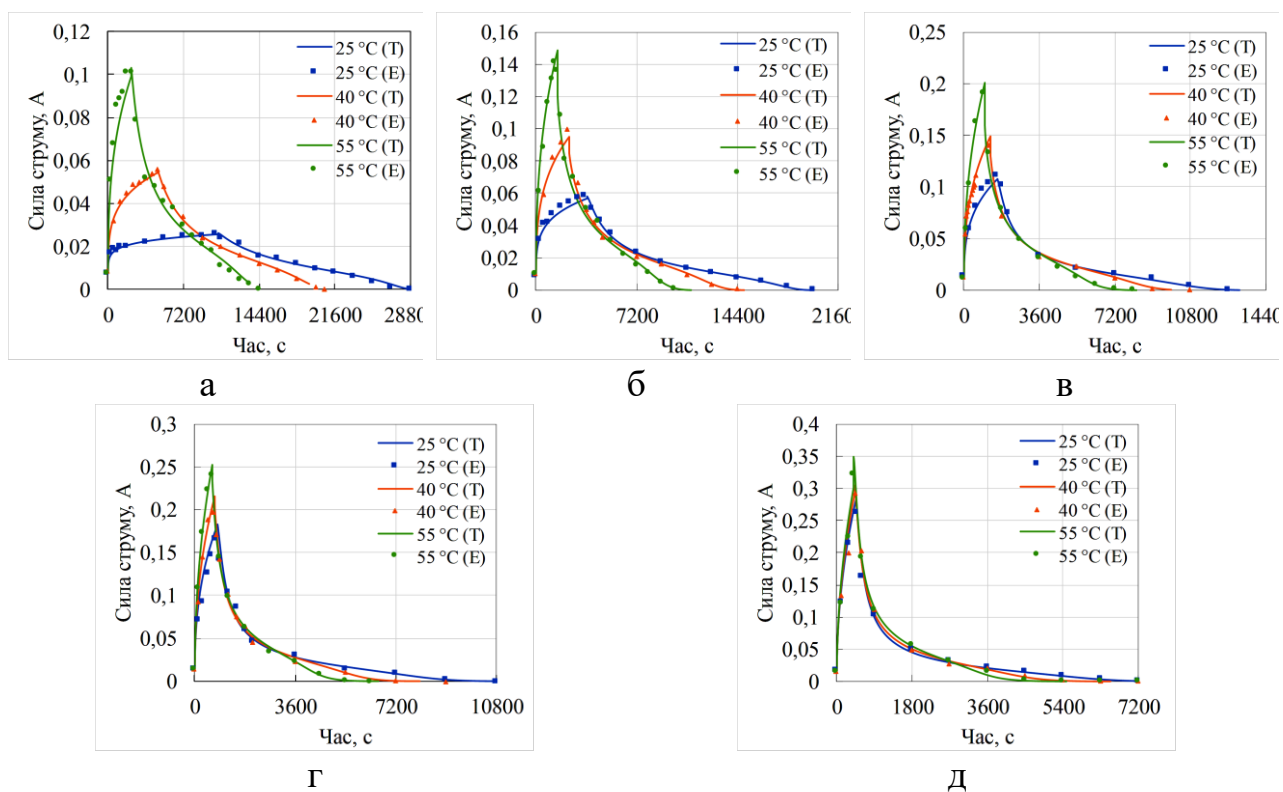


Рис. 14. Часові залежності сили струму прямого електронагріву в діапазоні температури теплоносія 25–55 °С та напруженості електричного поля: а – 20 В/см; б – 25 В/см; в – 30 В/см; г – 35 В/см; д – 40 В/см

Зростання величини сили струму через зразки та їх температури на початку сушіння пояснюється різким падінням електричного опору матеріалу. Залежності питомого електричного опору фруктової сировини в процесі комбінованого сушіння показано на рис. 15. Аналіз отриманих результатів показує, що початкові значення питомого електричного опору зразків знаходяться в межах 110–125 Ом·м. Надалі на початку сушіння відбувається різке зниження питомого електричного опору сировини до мінімальних значень. Встановлено, що чим вище напруженість електричного поля та температура повітря в сушильній шафі, тим нижчі мінімальні значення питомого опору.

З підвищенням напруженості з 20 до 40 В/см значення мінімального питомого опору сировини при температурі повітря 25 °С зменшилися на 77 %, при температурах 40 та 55 °С – на 62 та 47 % відповідно. Виявлено, що використання режимів сушіння з усередненою напруженістю поля вище 30 В/см знижує питомий електричний опір до мінімальних значень та підвищує силу струму прямого електронагріву, що призводить до значного перегріву

сировини в процесі зневоднення. Після закінчення етапу електроплазмолізу, окрім зменшення вологовмісту та температури сировини, спостерігається поступове підвищення величини питомого опору зразків. При досягненні вологовмісту 0,7–0,75 кг/кг та нижче відбувається різке підвищення величини питомого електричного опору, що визначає межу тривалості використання додаткового прямого електричного нагріву сировини в процесі сушіння.

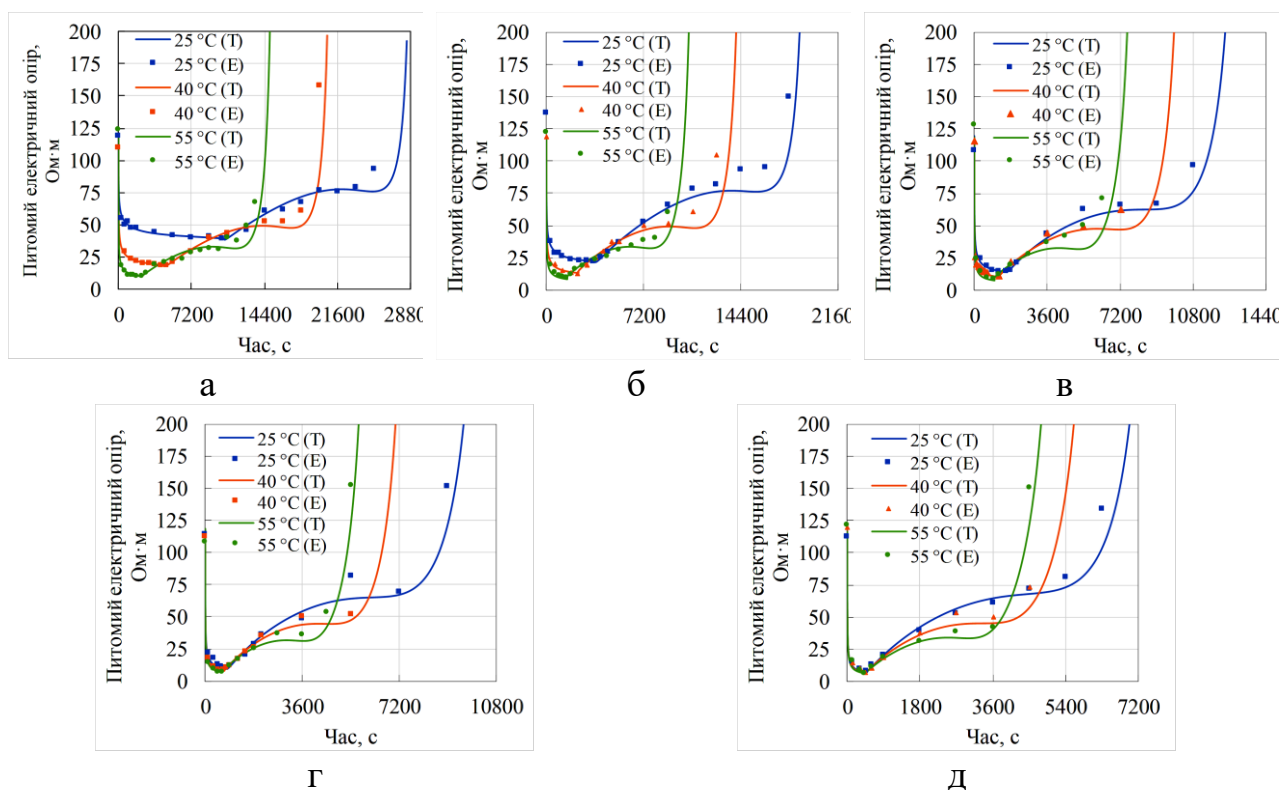


Рис. 15. Часові залежності питомого електричного опору фруктової сировини волюги в діапазоні температури теплоносія 25–55 °С та напруженості електричного поля: *а* – 20 В/см; *б* – 25 В/см; *в* – 30 В/см; *г* – 35 В/см; *д* – 40 В/см

Виконані в роботі дослідження доводять доцільність використання ультразвукової обробки перед здійсненням технологічного процесу сушіння. Встановлено, що ультразвукову обробку сировини перед сушінням при суто конвективному нагріві необхідно здійснювати протягом 10 хв, а при комбінованому сушінні з використанням прямого електричного нагріву – протягом 5 хв. При вказаних параметрах обробки забезпечується припустима інтенсивність вивільнення рідини з внутрішньоклітинного простору, що скорочує тривалість процесу конвективного та комбінованого сушіння з використанням прямого електронагріву на 27,8 та 73,5 % відповідно без підвищення температури теплоносія та напруженості електричного поля.

Максимальне значення сили електричного струму (рис. 14, а), що проходила через необроблені зразки при комбінованому нагріві становила 0,149 А. Після обробки ультразвуком протягом 5 хв максимальна сила струму в процесі сушіння досягала значення 0,142 А. Подальше збільшення тривалості обробки до 10 та 20 хв зменшило максимальні значення струму в процесі

зневоднення до 0,131 та 0,116 А, що на 7,7 та 18,3 % відповідно менше порівняно з режимом обробки протягом 5 хв.

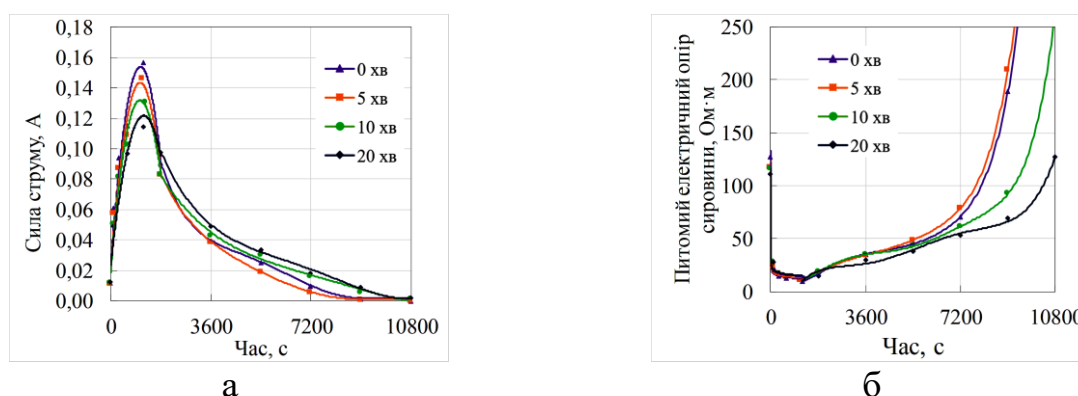


Рис. 14. Часові залежності сили струму прямого електронагріву (а) та питомого електричного опору сировини (б) в процесі комбінованого сушіння при температурі теплоносія 40 °С, напруженості прямого електронагріву 30 В/см та попередньою обробкою в УЗ ванні протягом 0–20 хв

Встановлено, що обробка фруктів перед сушінням ультразвуком протягом 5 хв призводить до зниження їх початкового питомого електричного опору (див. рис. 14, б). Після обробки в ультразвуковій ванні протягом 5 хв початкові значення опору зменшилися на 7,8 %. Однак подальше збільшення тривалості УЗ обробки до 10 та 20 хв підвищили початкові значення питомих опорів на 10,4 і 14,6 %. Підвищення електричного опору знизило ефективність прямого електричного нагріву сировини в процесі комбінованого сушіння та призвело до збільшення часу досягнення кінцевого вологовмісту на 23,4 % порівняно з режимом обробки протягом 5 хв.

На основі знімків поверхні висушеної фруктової сировини, отриманих методами растрової електронної мікроскопії, встановлено, що попередня ультразвукова обробка та прямий електричний нагрів фруктів у процесі сушіння значно збільшило шорсткість та пористість зразків, що призвело до полегшення видалення вологи та інтенсифікації процесу зневоднення. Визначено, що збільшення тривалості попередньої ультразвукової обробки сировини до 20 хв може призвести до руйнування поверхні та втрати корисного сухого залишку в готовій продукції.

У четвертому розділі «Розробка електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та ультразвуку» на основі теоретичних й експериментальних досліджень сформовано структуру й характеристики, описано технічні рішення та розроблено конструктивну схему електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та ультразвуку. Тривимірні моделі макетних зразків основних блоків електротехнологічного комплексу показано на рис. 15 та 16. Розроблений електротехнологічний комплекс дозволяє здійснювати попередню обробку фруктової сировини ультразвуком та її нагрів шляхом пропускання змінного електричного струму

в процесі конвективного сушіння з метою зниження енергоємності виробництва та отримання продукції встановленої якості.

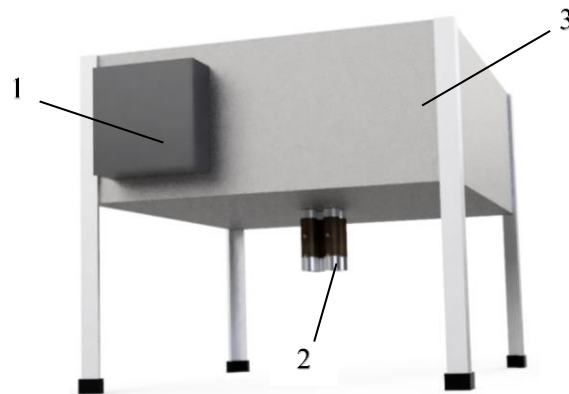


Рис. 15. Тривимірна модель блоку ультразвукової обробки сировини: 1 – блок ультразвукового генератора; 2 – випромінювальний блок; 3 – ємність для обробки

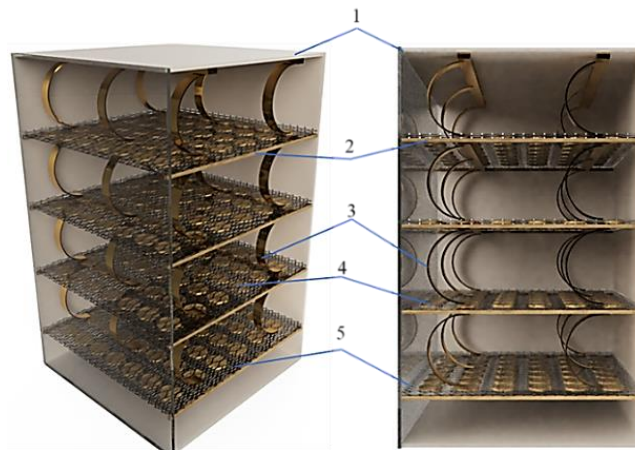


Рис. 16. Тривимірна модель блоку комбінованого сушіння сировини: 1 – корпус сушильної шафи; 2 – діелектричні вставки, 3 – пружні ламелі; 4 – сировина, що висушується; 5 – сітчасті електроди для прямого електронагріву

Розроблено структурну й функціональну схеми системи автоматизованого керування електротехнологічним комплексом комбінованого сушіння фруктової сировини та ультразвукової попередньої обробки. До структурної схеми автоматизації входить декілька контурів регулювання (рис. 17): частоти обертання вентилятора (швидкість руху теплоносія), температури повітря в шафі та усередненої напруженості електричного поля прямого електронагріву.

Запропонована система автоматизованого керування забезпечує регулювання параметрів джерела живлення електротехнологічного комплексу залежно від динаміки зміни параметрів процесу сушіння. Для коректного регулювання об'єктом автоматизації створено програму для контролера в середовищі CODESYS та виконано візуалізацію системи автоматизованого керування електротехнологічним комплексом.

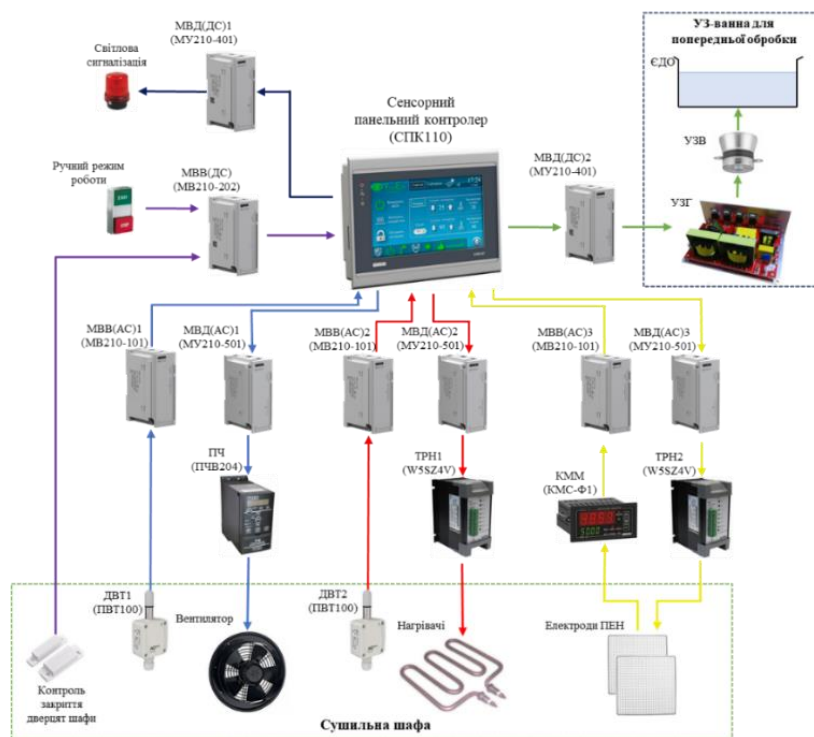


Рис. 17. Структурна схема автоматизованої системи керування електро-технологічним комплексом сушіння фруктової сировини

Обґрунтовано параметри джерела живлення та робочого органу електроакустичної системи попередньої обробки сировини перед сушінням. Визначено, що при разовому завантаженні фруктової сировини масою 20 кг обробку ультразвуком необхідно здійснювати в електроакустичній системі з такими параметрами: інтенсивність ультразвуку – 1 Вт/см^2 ; електрична потужність джерела живлення – 525 Вт; вихідна напруга джерела живлення – 211 В; частота ультразвукових коливань – 22 кГц; акустична потужність ультразвукового випромінювача – 420 Вт.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливе наукове завдання щодо розроблення електротехнологічного комплексу з підвищеною енергоефективністю для здійснення комбінованого процесу зневоднення фруктової сировини з використанням прямого електричного нагріву та попередньої ультразвукової обробки, що має суттєве значення для розвитку електротехнічних комплексів та систем переробки сільськогосподарської плодоовочевої продукції.

1. Виконано аналіз існуючих способів та апаратів для сушіння фруктової сировини. Встановлено, що максимальна температура сировини в процесі сушіння не повинна перевищувати $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Виявлено, що суттєвими недоліками вказаних пристроїв є високі масогабаритні характеристики, нерівномірність прогріву матеріалу, невисока інтенсивність видалення вологи та значні витрати енергії на одиницю виготовленої продукції, що призводить до значного зниження ККД сушильних установок та погіршення якості готової продукції. Для вирішення визначеної проблеми в роботі розроблено електротехнологічний

комплекс для здійснення комбінованого процесу зневоднення фруктової сировини, що відрізняється від відомих застосувань прямого електричного нагріву та попередньої обробки ультразвуком, при якому забезпечується зниження енергоємності виробництва із забезпеченням якості готової продукції.

2. Встановлено, що ультразвукову обробку фруктової сировини перед сушінням необхідно здійснювати за умови допустимої руйнації клітинної структури. Визначено, що при разовому завантаженні фруктової сировини масою 20 кг обробку ультразвуком необхідно здійснювати в електроакустичній системі з такими параметрами: інтенсивність ультразвуку – 1 Вт/см^2 ; електрична потужність джерела живлення – 525 Вт; вихідна напруга джерела живлення – 211 В; частота ультразвукових коливань – 22 кГц; акустична потужність ультразвукового випромінювача – 420 Вт; тривалість обробки різниться залежно від виду нагріву: при суто конвективному – 10 хв; при комбінованому сушінні з використанням прямого електричного – 5 хв. При вказаних параметрах електроакустичної системи забезпечується припустима інтенсивність вивільнення рідини з внутрішньоклітинного простору, що скоротило тривалість процесу конвективного та комбінованого сушіння з використанням прямого електронагріву на 27,8 та 73,5 % відповідно без підвищення температури теплоносія та напруженості електричного поля.

3. Вдосконалено одновимірну математичну модель комбінованого процесу сушіння з використанням прямого електричного нагріву шляхом врахування динаміки зміни питомого електричного опору сировини від температури зразків та їх вологовмісту. У результаті розв'язання початкової задачі визначено динаміку зміни вологовмісту та температури сировини й встановлено вимоги до джерела живлення електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електричного нагріву. Адекватність математичного моделювання комбінованого процесу сушіння підтверджено зіставленням результатів чисельних розрахунків та експериментальних досліджень. Встановлено, що комбіноване сушіння фруктової сировини з використанням прямого електричного нагріву слід здійснювати при таких параметрах: усереднена напруженість електричного поля – 30 В/см, температура теплоносія в сушильній шафі – $40 \text{ }^\circ\text{C}$, швидкість руху теплоносія – 0,4 м/с. При вказаних параметрах температура сировини в процесі комбінованого сушіння не перевищує $60 \text{ }^\circ\text{C}$, а тривалість зневоднення складає 140 хв, що на 70,5 % менше порівняно з конвективним сушінням за аналогічної температури теплоносія.

4. Визначено, що початкові значення питомого електричного опору сировини перед сушінням знаходяться в межах 110–125 Ом·м. Встановлено, що з підвищенням усередненої напруженості електричного поля прямого електричного нагріву з 20 до 40 В/см значення мінімального питомого опору фруктової сировини в процесі сушіння при температурі теплоагенту $25 \text{ }^\circ\text{C}$ зменшилися на 77 %, при температурах повітря 40 та $55 \text{ }^\circ\text{C}$ – на 62 та 47 % відповідно. Виявлено, що використання режимів сушіння з усередненою напруженістю поля вище 30 В/см знижує питомий електричний опір

до мінімальних значень та підвищує силу струму прямого електронагріву, що призводить до значного перегріву сировини в процесі зневоднення.

5. Встановлено, що в результаті попередньої обробки ультразвуком протягом 5 хв початкові значення питомого електричного опору сировини зменшилися на 7,8 %. Виявлено, що збільшення тривалості ультразвукової обробки до 10 та 20 хв підвищили початкові значення питомого опору на 10,4 і 14,6 %, що призвело до зниження максимальної сили електричного струму при прямому електронагріві на 7,7 та 18,3 % відповідно. Зменшення сили струму знизило ефективність прямого електричного нагріву сировини в процесі комбінованого сушіння та призвело до збільшення часу досягнення кінцевого вологовмісту на 23,4 % порівняно з режимом обробки протягом 5 хв.

6. На основі знімків поверхні висушеної фруктової сировини, отриманих методами растрової електронної мікроскопії, встановлено, що попередня ультразвукова обробка та прямий електричний нагрів фруктів у процесі сушіння значно збільшило шорсткість та пористість зразків, що призвело до полегшення видалення вологи та інтенсифікації процесу зневоднення. Результати лабораторних випробувань сухофруктів, висушених з використанням прямого електронагріву та попередньої ультразвукової обробки, на відповідність ДСТУ 8494:2015 «Фрукти насіннячкові сушені. Технічні умови» свідчать, що показники якості готової продукції відповідають вимогам чинного стандарту, а отже, запропонований електротехнологічний комплекс доцільно застосовувати у виробничих умовах.

7. Сформовано структуру, визначено характеристики, описано технічні рішення та розроблено конструктивну схему електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та попередньої ультразвукової обробки. Розроблений електротехнологічний комплекс дозволяє здійснювати попередню обробку фруктової сировини ультразвуком та її нагрів шляхом пропускання змінного електричного струму в процесі конвективного сушіння з метою зниження енергоємності виробництва та отримання продукції встановленої якості. Розроблено структурну й функціональну схеми системи автоматизованого керування, яка забезпечує регулювання параметрів джерела живлення електротехнологічного комплексу залежно від динаміки зміни параметрів процесу сушіння. Для коректного регулювання об'єктом автоматизації створено програму для контролера в середовищі CODESYS та виконано візуалізацію системи автоматизованого керування електротехнологічним комплексом сушіння фруктової сировини.

8. Аналіз енергетичної ефективності застосування електротехнічного комплексу для сушіння фруктової сировини показав, що використання попередньої ультразвукової обробки та прямого електричного нагріву знижує питомі витрати енергії на видалення 1 кг вологи на 47,67 %, а продуктивність сушіння збільшується в 2,6 раза. Техніко-економічна ефективність від зниження прямих експлуатаційних витрат на сушіння складає 105,24 грн/кг висушених фруктів. Собівартість висушеної продукції становить 135,21 грн/кг, що на 43 % менше порівняно з електроустановками конвективного типу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Савойський О. Ю. Аналіз методів сушки плодоовочевої сировини та їх класифікація. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. 2016. Вип. 175. С. 136–141.

2. Яковлев В. Ф., **Савойський О. Ю.** Експериментальні дослідження взаємного впливу ультразвукових коливань та прямого електронагріву на процес сушіння біологічних об'єктів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2017. Вип. 17. Т. 3. С. 83–90. *(Здобувачем на основі експериментальних досліджень процесу сушіння біологічного об'єкту в радіаційно-конвективній сушарці отримано залежності зміни вологості продукту при взаємному використанні додаткових методів нагріву (електричного та акустичного)).*

3. **Савойський О. Ю.**, Яковлев В. Ф. Електрофізичний метод інтенсифікації процесу сушки фруктів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2017. Ви. 7. Т. 1. С. 219–224. *(Здобувачем розроблено та проведено аналіз методу інтенсифікації процесу сушіння фруктів з використанням прямого електричного нагріву).*

4. Яковлев В. Ф., **Савойський О. Ю.** Використання прямого електричного нагріву в технологічному процесі комбінованого сушіння фруктів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені П. Василенка. Технічні науки. 2018. Вип. 195. С. 91–96. *(Здобувачем складено рівняння зв'язку параметрів дії електромагнітного поля на біологічний об'єкт рослинного походження з його біофізичними та електрофізичними характеристиками).*

5. **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. Технічні науки. 2019. Вип. 203. С. 107–110. *(Здобувачем отримано теоретичні та експериментальні залежності питомого електричного опору яблучної сировини в процесі сушіння при зміні температурних режимів та концентрації сухих розчинених речовин).*

6. **Савойський О. Ю.**, Яковлев В. Ф., Сіренко В. Ф. Дослідження комбінованого процесу сушіння високовологої яблучної сировини. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2019. Вип. 9. Т. 1. *(Здобувачем розроблено структурну схему експериментальної установки та досліджено вплив основних технологічних параметрів на процес комбінованого (конвективного в поєднанні з прямим електронагрівом) сушіння яблучної сировини).*

7. Савойський О. Ю. Дослідження електроплазмолізу яблучної сировини в процесі комбінованого сушіння Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2020. Вип. 20. Т. 4. С. 247–258.

**Статті у наукових виданнях,
включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus
та/або Web of Science Core Collection**

8. **Savoiskyi O.**, Yakovliev V., Sirenko V. Determining the kinetic and energy parameters for a combined technique of drying apple raw materials using direct electric heating. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1 (11 (109)). P. 33–41. *(Здобувачем здійснено обґрунтування раціональних параметрів процесу, зокрема, максимальну температуру теплоносія в сушильній шафі, а також граничні значення напруженості електричного поля при прямому електронагріві, які забезпечують належну якість готового продукту).*

9. **Savoiskyi O.**, Sirenko V. Revealing the influence of ultrasonic processing on the kinetic parameters of convective and combined drying of raw apple materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 2 (11 (122)). P. 91–98. *(Здобувачем розроблено методику досліджень та визначено вплив попередньої ультразвукової обробки на кінетичні параметри процесу комбінованого сушіння яблучної сировини з використанням прямого електронагріву).*

10. Chervinsky L., **Savoiskyi O.**, Sirenko V. The influence of ultrasonic processing on the structure and electrophysical properties of fruit in combined drying. Machinery & Energetics. 2023. Vol. 14 (2). P. 70–79. *(Здобувачем встановлено залежності зміни величини сили електричного струму прямого електронагріву та питомого електричного опору яблучної сировини в процесі зневоднення, а також досліджено зміни мікроструктури висушених яблук при різних режимах обробки в ультразвуковій ванні).*

Статті у наукових виданнях інших держав

11. **Savoiskyi O.**, Yakovliev V., Sirenko V. Comparative analysis of methods supplies thermal energy in high-water biological objects during drying. ScienceRise. 2021. № 1. С. 3–10. *(Здобувачем складено рівняння теплового балансу при комбінованому підводі тепла та встановлено залежності тривалості нагріву та коефіцієнта корисної дії при прямому електричному нагріві від напруги на електродах).*

12. **Savoiskyi O.**, Sirenko V. Revealing the influence of temperature and moisture content on electrophysical parameters of raw apple materials. EUREKA: Life Sciences. 2023. № 2. P. 14–20. *(Здобувачем здійснено математичну обробку експериментальних даних та отримано залежності величини питомого електричного опору яблучної сировини від її вологовмісту та температури).*

Тези наукових доповідей

13. Савойський О. Ю. Метод автоматичного визначення маси досліджуваного зразка в процесі сушіння. Енергозабезпечення технологічних процесів: VIII Міжнародна науково-практична конференція пам'яті І. І. Мартиненка, м. Мелітополь, 13–14 червня 2019 року: тези доповіді. Мелітополь, 2019. С. 54).

14. Савойський О. Ю. Оцінка ефективності використання прямого електричного нагріву в процесі сушіння яблучної сировини. Сучасні проблеми землеробської механіки: XX Міжнародна наукова конференція, присвячена 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Миколаїв, 17–19 жовтня 2019 року: тези доповіді. Миколаїв, 2019. С. 195–196.

15. Савойський О. Ю. Аналіз ефективності використання ультразвукових коливань високої інтенсивності в технологічному процесі сушіння рослинної сировини. Молодь і технічний прогрес в АПВ. Інноваційні розробки в аграрній сфері: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 7–8 травня 2020 року: тези доповіді. Харків, 2020. Т. 2. С. 15–16.

16. Сіренко В. Ф., **Савойський О. Ю.** Електроплазмоліз в технології сушіння яблучної сировини. Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів: Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Умань, 7 квітня 2020 року: тези доповіді. Умань, 2020. С. 80. *(Здобувачем здійснено аналіз впливу явища електроплазмолізу під час прямого електронагріву на ефективність сушіння сировини).*

17. Савойський О. Ю. Використання омичного нагріву в технологічному процесі сушіння плодовоовочевої сировини. Сучасні проблеми землеробської механіки: XXI Міжнародна наукова конференція, присвячена 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м. Харків, 17–18 жовтня 2020 року: тези доповіді. Харків, 2020. С. 162.

18. Савойський О. Ю. Вибір ефективного способу сушіння плодовоовочевої сировини. Технології XXI сторіччя: 26-а Міжнародна науково-практична конференція, м. Суми, 7–9 грудня 2020 року: тези доповіді. Суми, 2020. Ч. 1. С. 27–28.

19. Савойський О. Ю. Визначення тривалості електроплазмолізу яблучної сировини в технологічному процесі сушіння. Сучасні проблеми інноваційного розвитку електричної інженерії: II Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція, м. Мелітополь, 5–25 квітня 2021 року: тези доповіді. Мелітополь, 2021. С. 22–23).

20. Савойський О. Ю. Дослідження електричного опору яблучної сировини на етапі електроплазмолізу в процесі комбінованого сушіння. Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: III Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція пам'яті В. В. Овчарова, м. Мелітополь, 15–19 квітня 2021 року: тези доповіді. Мелітополь, 2021. С. 97–98.

21. Савойський О. Ю. Визначення тривалості та ефективності нагрівання висушеної сировини прямим електронагрівом. Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: IV Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція пам'яті В. В. Овчарова, м. Мелітополь, 04–18 листопада 2021 року: тези доповіді Мелітополь, 2021. С. 95–97.

22. Сіренко В. Ф., **Савойський О. Ю.** Дослідження комбінованого способу сушіння яблук. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 25–26 листопада 2021 року: тези доповіді. Харків, 2021. С. 28. *(Здобувачем*

здійснено аналіз впливу прямого електричного нагріву та ультразвуку на тривалість сушіння продукту).

23. Савойський О. Ю. Енергозберігаючий спосіб комбінованого сушіння фруктової сировини. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: IV Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, м. Запоріжжя, 01–25 листопада 2022 року: тези доповіді. Запоріжжя, 2022. С. 101–102.

Патент на корисну модель

24. Яковлев В. Ф., Савойський О. Ю., Сіренко В. Ф. Спосіб комбінованого сушіння біологічних об'єктів: Патент України № 127324UA. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 2018. *(Здобувачем проведено патентний пошук і здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, обґрунтовано режимні параметри і характеристики запропонованого способу).*

АНОТАЦІЯ

Савойський О. Ю. Електротехнологічний комплекс сушіння фруктової сировини з використанням прямого електронагріву та ультразвуку. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2024.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню параметрів електротехнологічного комплексу з метою підвищення енергоефективності технологічного процесу сушіння.

В основу дисертації покладено наукову гіпотезу про те, що попередня обробка ультразвуком та комбінований нагрів сировини з використанням прямого електронагріву може призвести до інтенсифікації процесу сушіння, що в кінцевому етапі призведе до зниження питомих витрат енергії на видалення вологи при забезпеченні встановленої якості готової продукції. Наукова гіпотеза підтверджена результатами теоретичних і експериментальних досліджень, при яких були визначені вимоги до джерела живлення електротехнологічного комплексу сушіння фруктової сировини.

Розрахунки енергетичної ефективності підтвердили доцільність впровадження електротехнологічного комплексу для переробки сировини в промислових масштабах.

Ключові слова: прямий електричний нагрів, усереднена напруженість електричного поля, питомий електричний опір сировини, ультразвукова обробка, частота ультразвукових коливань, резонанс, акустичний опір, комбіноване сушіння, вологовміст, швидкість видалення вологи, енерговитрати.

ANNOTATION

Savoiskiy O. Yu. Electrotechnological complex for drying fruit raw materials using direct electric heating and ultrasound. Qualifying Scientific Work on Manuscript Rights.

Dissertation for the degree of Candidate degree of Technical Sciences on the specialty 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2024.

The dissertation is dedicated to solving an important scientific problem concerning the development of an electro-technological complex with enhanced energy efficiency for the implementation of a combined process of dehydrating fruit raw materials using direct electric heating and preliminary ultrasonic treatment. This is of significant importance for the development of electrical complexes and systems for processing agricultural fruit and vegetable products.

It has been established that ultrasonic treatment of fruit raw materials before drying should be carried out under the condition of permissible destruction of the cellular structure. It has been determined that for a single load of 20 kg of fruit raw materials, ultrasonic treatment should be performed in an electroacoustic system with the following parameters: ultrasound intensity – 1 W/cm^2 ; electrical power of the power source – 525 W; output voltage of the power source – 211 V; frequency of ultrasonic oscillations – 22 kHz; acoustic power of the ultrasonic emitter – 420 W; treatment duration: with purely convective heating – 10 minutes; with combined drying using direct electric heating – 5 minutes. Under these electroacoustic system parameters, an acceptable intensity of fluid release from the intracellular space is ensured, reducing the duration of the convective and combined drying process using direct electric heating by 27.8 and 73.5 %, respectively, without increasing the temperature of the heat carrier and the intensity of the electric field.

The one-dimensional mathematical model of the combined drying process using direct electric heating has been improved by taking into account the dynamics of the specific electrical resistance of the raw material as it changes with the temperature and moisture content of the samples. As a result of solving the initial problem, the dynamics of moisture content and temperature of the raw material were determined, and the requirements for the power source of the electro-technological complex for drying fruit raw materials using direct electric heating were established.

It has been determined that the combined drying of fruit raw materials using direct electric heating should be carried out under the following parameters: average electric field intensity – 30 V/cm , temperature of the heat carrier in the drying chamber – $40 \text{ }^\circ\text{C}$, heat carrier velocity – 0.4 m/s . Under these parameters, the temperature of the raw material during the combined drying process does not exceed $60 \text{ }^\circ\text{C}$, and the dehydration duration is 140 minutes, which is 70.5 % less compared to convective drying at the same heat carrier temperature.

It was determined that the initial values of the specific electrical resistance of the raw material before drying range from 110 to $125 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$. It was established that with the increase in the average electric field intensity of direct electric heating

from 20 to 40 V/cm, the minimum specific resistance values of the fruit raw material during drying at a heat carrier temperature of 25 °C decreased by 77 %, and at air temperatures of 40 and 55 °C, by 62 and 47 %, respectively.

It was established that as a result of preliminary ultrasonic treatment for 5 minutes, the initial values of the specific electrical resistance of the raw material decreased by 7.8 %. It was found that increasing the duration of ultrasonic treatment to 10 and 20 minutes increased the initial values of specific resistance by 10.4 % and 14.6 %, respectively, which led to a decrease in the maximum electric current strength during direct electric heating by 7.7 and 18.3 %, respectively. The decrease in current strength reduced the efficiency of direct electric heating of the raw material during the combined drying process and led to an increase in the time to achieve the final moisture content by 23.4 % compared to the 5-minute treatment mode.

The structure and characteristics have been formed, technical solutions have been described, and a design scheme for an electro-technological complex for drying fruit material using direct electrical heating and preliminary ultrasonic treatment has been developed. Structural and functional diagrams of the automated control system have been developed, which ensure the regulation of the power source parameters of the electro-technological complex depending on the dynamics of the drying process parameters.

An analysis of the energy efficiency of using the electro-technological complex for drying fruit material showed that the use of preliminary ultrasonic treatment and direct electrical heating reduces the specific energy consumption for removing 1 kg of moisture by 47.67 %, and the drying productivity increases by 2.6 times.

Key words: direct electrical heating, average electric field intensity, specific electrical resistance of the raw material, ultrasonic treatment, frequency of ultrasonic oscillations, resonance, acoustic resistance, combined drying, moisture content, moisture removal rate, energy consumption.