

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Герасимчук Андрій Андрійович**

**УДК 66.047**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ВІНФРАЧЕРВОНОГО**  
**СУШННЯ ВИСОКОВОЛОГОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ**  
**СИРОВИНИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Герасимчук А.А.

**Керівник роботи**

Дерев'янку Д.А.

доктор технічних наук, професор

**Житомир – 2024**

## АНОТАЦІЯ

**Герасимчук Андрій Андрійович. Обґрунтування параметрів і режимів інфрачервоного сушіння високовологої сільськогосподарської сировини – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В магістерській роботі розроблено конструкцію та виготовлено експериментальний компактний багатоярусний пристрій динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини з високим вмістом біологічно активних речовин.

Експериментально визначено порівняльні характеристики процесу сушіння виноградної вижимки в розробленому компактному пристрої динамічного інфрачервоного сушіння та компактному пристрої конвективного сушіння. Ефективними режимами сушіння є гранично великі за допустимим для збереження біологічно активних речовин температури сировини під час сушіння. Зниження температури сировини під час сушіння з 60 °С до 50 °С призводить до збільшення питомих енергетичних витрат більш ніж на 10 %, а тривалість сушіння збільшується в 1,7 рази. Динамічна інфрачервона сушка в розробленому компактному пристрої ефективніше за конвективну сушку в компактному пристрої за витратами в 1,2 рази, а за тривалістю сушіння в 1,3 рази.

Конструкція пристрою динамічної інфрачервоної сушки має резерви збільшення рівномірності розподілу температури сировини в ході сушіння за рахунок підвищення рівномірності розподілу нагрівальної спіралі інфрачервоного випромінювача в кварцовій трубці і збільшення швидкості руху каретки з інфрачервоними випромінювачами.

*Ключові слова: інфрачервона сушка, конструкція, процес, параметри, сировина.*

## ANNOTATION

**Gerasymchuk Andriy Andriyovych. Justification of parameters and modes of infrared drying of high-moisture agricultural raw materials.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

In the master's thesis, the design and manufacture of an experimental compact multi-tiered device for dynamic infrared drying of plant raw materials with a high content of biologically active substances were developed.

Comparative characteristics of the grape pomace drying process in the developed compact device for dynamic infrared drying and a compact device for convective drying were experimentally determined. Effective drying modes are the maximum permissible raw material temperature during drying for preserving biologically active substances. Reducing the temperature of the raw material during drying from 60 °C to 50 °C leads to an increase in specific energy consumption by more than 10%, and the drying duration increases by 1.7 times. Dynamic infrared drying in the developed compact device is more efficient than convective drying in the compact device by 1.2 times in terms of costs and 1.3 times in terms of drying duration.

The design of the dynamic infrared drying device has the potential to increase the uniformity of the temperature distribution of the raw material during drying by increasing the uniformity of the distribution of the heating spiral of the infrared emitter in the quartz tube and increasing the speed of movement of the carriage with infrared emitters.

*Keywords: infrared drying, design, process, parameters, raw material.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	18
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Фенольні речовини, що входять до складу рослинної сільськогосподарської сировини, мають високу біологічну активність. Рослинні поліфеноли успішно використовуються у фармакології як речовини, що мають капілярозміцнювальну, нейрорегуляторну, імуномодулюючу та протипухлинну активність. Багато флавоноїдів, які нині все частіше називають «біофлавоноїдами», здатні нормалізувати проникність капілярів і служити синергістами вітаміну С [1].

Сільськогосподарською рослинною сировиною, з характерним високим вмістом фенольних речовин, є технічні сорти винограду. Сучасні технології виробництва сухих столових вин призводять до втрат до 90 % фенольних речовин вихідної сировини через швидке (протягом доби) псування виноградної вижимки і вимушеної її утилізації як відходів виробництва.

У сучасних умовах частки виробництва сухих столових вин у малих виноробних підприємствах (так званих підприємствах крафтового виноробства), що динамічно збільшується, виноробство розподілене по території всього виноробного регіону і для збереження фенольних речовин переробка виноградної вижимки повинна здійснюватися в кожному виноробному підприємстві.

Способами переробки виноградної вижимки, спрямованими на збереження складу біологічно активних речовин (БАР) вихідної сировини, є сушіння, спиртування, кандування та заморожування. Відомі технології консервування вихідних властивостей виноградної вижимки конвективною сушкою та спиртуванням. Технології та пристрої конвективного сушіння забезпечують рентабельне виробництво продуктів сушіння виноградної вижимки при великих

величинах продуктивності (1 тонна вижимки і більше на добу), технології спиртування характерні високою вартістю та складністю організації.

Технології сушіння є переважними для збереження властивостей рослинної сировини, так як реалізуються в недорогому обладнанні різної продуктивності і дозволяють за короткий проміжок часу видалити з сировини необхідну для забезпечення тривалого зберігання БАР у продукті сушіння кількість вологи, що задовольняють рентабельне виробництво продукту сушіння витрат.

Найбільше БАР у продуктах сушіння рослинної сировини забезпечують технології сублімаційної сушіння [1, 8, 14]. Їхнє широке застосування в малих виноробних підприємствах та фермерських господарствах обмежують високу вартість обладнання для швидкого заморожування та вакуумування, а також високі питомі витрати енергії на одержання продукту сушіння. Інфрачервона сушіння при незначному відставанні за якістю продукту сушіння від продуктів сублімаційного сушіння реалізується в недорогих пристроях при питомих витратах енергії, менших, ніж у пристроях конвективного сушіння порівнянної продуктивності.

Таким чином, перспективним є використання для сушіння виноградної вижимки компактних пристроїв інфрачервоної сушіння, відмінними рисами яких є незалежність питомих витрат на процес сушіння від продуктивності пристрою, а також суттєво вищі рівні безпеки в продуктах сушіння біологічно активних речовин у порівнянні з продуктами конвективної сушіння, завдяки скорочення часу сушіння та малого контакту поверхні сировини та атмосферного повітря в ході сушіння [1, 6].

**Об'єкт дослідження** – компактний багатоярусний пристрій динамічного інфрачервоного сушіння високовологої рослинної сировини.

**Предмет дослідження** – тепловий стан сировини в ході сушіння, процеси вологовидалення та зміни вмісту біологічно активних речовин у процесі динамічного інфрачервоного сушіння.

**Мета дослідження** – підвищення якості та скорочення втрат фенольних речовин, підвищення продуктивності пристроїв інфрачервоного сушіння виноградної вижимки шляхом обґрунтування конструктивних та режимних параметрів компактних багатоярусних пристроїв динамічного інфрачервоного сушіння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Запропонувати метод і компактний багатоярусний пристрій динамічного інфрачервоного сушіння високоволової рослинної сировини;
2. Експериментально дослідити порівняльну кінетику сушіння виноградної вижимки та енергетичні витрати на процес сушіння в компактному пристрої динамічного інфрачервоного сушіння та пристрої конвективного сушіння при різних температурах сировини в ході сушіння;
3. Експериментально дослідити ступінь збереження біологічно активних речовин при динамічному інфрачервоному сушінні виноградної вижимки в компактному багатоярусному пристрої.

**Методи наукового дослідження.** Методологічною основою дослідження є вивчення кінетики показників якості сушіння сировини, тобто залежностей зміни фізичних величин, що визначають якість продукту сушіння, від часу, інтенсивності, характеру та дискретності динамічного теплового впливу на сировину інфрачервоним випромінюванням у пристрої динамічної інфрачервоної сушіння.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Герасимчук А.А.** Кормова цінність продуктів переробки сої та бобових трав. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 431-434.

2. Дерев'янку Д.А., Герасимчук А.А., Романюк В.А. Експериментальна камера динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». (01-18 жовтня 2024 р.). <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (дата звернення 01.12.2024).

3. Дерев'янку Д.А., Герасимчук А.А. Способи та компактні пристрої інфрачервоного сушіння рослинної сировини. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «ЕКАР – пріоритетні напрями розвитку агропромислового виробництва України в умовах Євроінтеграції», (22-23 жовтня 2024 року), ІМА АПВ НААН України, Глеваха. 2024. С.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що розроблений компактний багатоярусний пристрій динамічного інфрачервоного сушіння високоволової рослинної сировини.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 53 сторінки комп'ютерного тексту, містить 26 рисунків та 4 таблиці.



## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1. Способи та компактні пристрої інфрачервоного сушіння рослинної сировини

Інфрачервоне сушіння здійснюється в пристроях камерного і конвеєрного типів. І ті, й інші пристрої можуть мати одноярусне та багатоярусне виконання.

Принципові схеми одноярусних пристроїв інфрачервоного сушіння наведено на рис. 1.

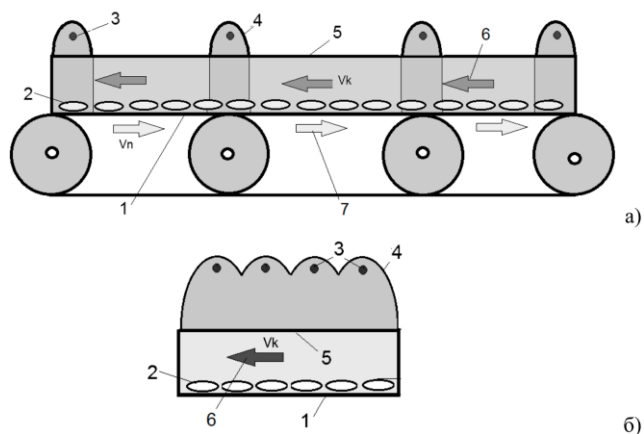


Рис. 1.1. Принципові схеми одноярусних пристроїв інфрачервоного сушіння: а – конвеєрний пристрій; б – камерний пристрій 1 – сітчаста стрічка (лоток); 2 – шар вологої сировини; 3 – джерела теплового випромінювання; 4 – дзеркальний відбивач; 5 – канал ярусу пристрою; 6 – напрямок руху повітря; 7 – напрямок руху стрічки.

У пристроях (рис. 1) джерела випромінювання 3 розміщують над поверхнею 2 шару вологої сировини, для спрямування потоку теплового випромінювання на поверхню 2 джерела випромінювання оснащуються дзеркально відбивними екранами (відбивачами) 4 переважно параболічної форми. Падаючий на поверхню сировини потік теплового випромінювання

призводить до нагрівання шару сировини, що інтенсифікує випаровування з поверхні сировини вологи. Випарена з сировини волога виноситься з об'єму пристрою (каналу ярусу пристрою) 5 організованим за допомогою витяжних вентиляторів потоком повітря 6. У конвеєрних пристроях волога сировина розміщена на рухомій сітчастій стрічці 1, а в камерних пристроях сировина розміщена на сітчастих лотках Використання сітчастої стрічки покращує умови випаровування вологи із сировини та дає змогу підвищити ефективність використання багатоярусних пристроїв, у яких яруси розташовують один над одним.

Як джерела випромінювання використовують трубчасті електронагрівальні елементи (ТЕНи), спіральні нагрівальні елементи в трубках кварцового скла (спіралі відкритого типу) і газонаповнені лампи розжарювання. Температура поверхні ТЕНів сягає 600-650 °С, поверхні спіралей із тугоплавких стійких до атмосферного впливу матеріалів (ніхром, фехраль) досягає 900 °С, температура поверхні вольфрамової спіралі газонаповненої галогенової лампи складає 2500-2700 °С. За даними багатьох досліджень при температурі поверхні нагрівального елемента нижче 700 °С половина енергії, що виділяється на поверхні нагріву, відводиться в навколишнє середовище тепловим випромінюванням, а половина - конвекцією. Тобто пристрої, що використовують трубчасті нагрівальні елементи, не можна називати пристроями інфрачервоного сушіння, оскільки вони по суті є пристроями комбінованого конвективно-інфрачервоного сушіння. Перевагою використання спіралей відкритого типу і ламп розжарювання є їхня мала інерційність, що дає змогу досить легко автоматизувати процес сушіння релейними пристроями управління живленням нагрівальних елементів.

Основними недоліками камерних пристроїв є висока нерівномірність теплового впливу на поверхню сировини та мала об'ємна продуктивність камерних пристроїв. Причинами цих недоліків є нерівномірність теплового потоку локального джерела теплового випромінювання на плоску поверхню сировини. Необхідність значного віддалення джерела випромінювання від

поверхні сировини призводить до додаткових втрат теплової енергії джерел випромінювання через збільшення потоку випромінювання за межі поверхні сировини. Для зниження таких втрат внутрішні поверхні пристрою сушіння мають бути виконані з матеріалів із високою відбивною здатністю, що призводить до істотного збільшення вартості пристрою.

Перераховані недоліки камерних пристроїв усунуто в пристроях, розроблених на кафедрі агроінженерії та технічного сервісу. У цих пристроях пряме випромінювання джерел зведене до мінімуму і замінено одноразово і дворазово відбитим від спеціально спрофільованих дзеркально відбиваючих поверхонь, при цьому джерела випромінювання винесені за межі об'єму, в якому розташована сировина. Схема такого камерного пристрою наведена на рис. 1.2.

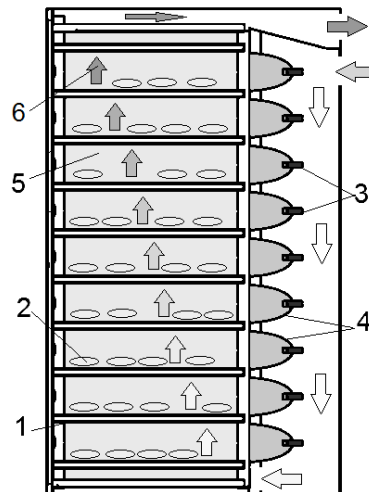


Рис. 1.2. Схема багатоярусного камерного пристрою інфрачервоного сушіння: 1 – сітчастий лоток; 2 – шар вологої сировини; 3 – джерело теплового випромінювання; 4 – дзеркальний відбивач; 5 – канал ярусу пристрою; 6 – напрямок руху повітря.

У пристрої потік теплового випромінювання, що генерується випромінювачами 3, від відбивачів 4 рівномірно розподіляється поверхнею 2 сировини, розміщеної на сітчастих лотках 1. Використання сітчастих лотків забезпечує опромінення як верхньої, так і нижньої поверхонь сировини, що істотно збільшує ефективність використання теплового випромінювання для

сушіння сировини. Випарена волога виводиться крізь сітчасті лотки витяжними вентиляторами.

Використання відбитого теплового випромінювання забезпечило рівномірність теплового впливу на поверхні сировини, дало змогу суттєво, порівняно зі схемою на рис. 1 б, зменшити відстань між ярусами лотків і наблизити цю відстань до величин, які використовуються в конвективних пристроях. Так, відстань між ярусами пристрою, схема якого представлена на рис. 2, становить 100 мм.

Проте недоліками таких пристроїв залишаються низька об'ємна продуктивність і висока вартість, зумовлена застосуванням великої кількості дорогих дзеркально відбивних матеріалів і складною високоточною технологією виготовлення відбивачів.

Для створення компактних камерних пристроїв, що конкурують з конвективними пристроями сушіння за об'ємною продуктивністю, необхідно забезпечити відстань між ярусами пристрою не більше 60 мм.

Вирішення задачі рівномірності теплової обробки всієї поверхні сировини вирішується рухом сировини, розміщеної на стрічці конвеєрного пристрою (рис. 1 а). Теплове навантаження на оброблювану сировину може встановлюватися тепловою потужністю випромінювача, частотою розміщення випромінювачів уздовж стрічки конвеєра і швидкістю руху конвеєрної стрічки. Такі технічні рішення дають змогу розміщувати джерела випромінювання в безпосередній близькості від поверхні сировини.

Недоліками, що перешкоджають створенню на базі конвеєрних пристроїв компактних пристроїв інфрачервоного сушіння високовологої рослинної сировини з високою концентрацією біологічно активних речовин, є такі:

- обмеженість стрічки конвеєра, включно з можливістю її багаторярусного каскадного виконання, не гарантує необхідний рівень вологості продукту сушіння. Продукт може бути не досушений за недостатнього часу та потужності інфрачервоних випромінювачів, або перегрітий із втратою якості продукту

сушіння, зокрема, втратою біологічно активних речовин у продукті, за надлишкової потужності інфрачервоних випромінювачів. Тобто конвеєрний пристрій не забезпечує універсальність свого застосування для різних видів сировини та її вихідної вологості. Можливим варіантом технічного рішення, що забезпечує необхідний рівень вологості продукту сушіння, є кругова подача сировини на вхід стрічки конвеєра після виходу цієї сировини зі стрічки.

- тепловий вплив здійснюється тільки на верхню поверхню оброблюваної сировини, оскільки джерела випромінювання розташовані над стрічкою конвеєра;

- постійна робота конвеєра з переміщення сировини підвищує енерговитрати на процес сушіння, тому що сама конструкція конвеєра, призначеного для постійного переміщення значної маси вологої сировини, є масивною та потребує значних витрат енергії для її функціонування; - для спрямування потоку теплового випромінювання від джерел на поверхню сировини та зниження втрат теплоти випромінювання інфрачервоних нагрівальних елементів внутрішні верхня й бокові стінки тунелю конвеєра виконано із матеріалів, що дзеркально відображають поверхню сировини, що підвищує вартість пристрою.

У пристроях інфрачервоного сушіння рослинної сировини з метою збереження її біологічного потенціалу у вигляді поживної цінності та складу біологічно активних речовин обмеження температури сировини реалізується засобами автоматики, зокрема релейними регуляторами температури. При цьому контролю підлягає температура поверхні сировини або її поверхневого шару. Засобами контролю температури слугують як контактні датчики – терморпари, робочі спаї яких розміщують безпосередньо в поверхневому шарі сировини так і безконтактні оптичні пірометри, чутливі елементи яких спрямовані на поверхню сировини.

## **1.2. Інтенсифікація процесу сушіння методами імпульсного опромінення сировини інфрачервоним випромінюванням**

Сушіння рослинної сільськогосподарської сировини як процес видалення вологи із сировини шляхом підведення до неї теплоти є тепломасообмінним процесом, у якому потік теплоти надходить до маси сировини, а з маси сировини виходить волога випаровуванням у навколишнє середовищезазвичай, газоподібне середовище.

Завданнями сушіння сільськогосподарської сировини є видалення з неї вологи та збереження в сировині корисних властивостей сировини. Тобто основним завданням процесу сушіння є транспорт вологи з маси сировини та її випаровування в навколишнє середовище, а процес підведення теплоти до сировини є таким, що забезпечує процес сушіння. Підведення теплоти до вологи в сировині дає змогу підвищити її енергію і відповідно, збільшити потік маси вологи з внутрішніх шарів сировини на її кордон та інтенсифікувати її випаровування з поверхні сировини в навколишнє середовище.

У загальному випадку внутрішній масоперенос у матеріалі під час сушіння може відбуватися під дією трьох рушійних сил: градієнта вологовмісту (масопровідність або концентраційна дифузія вологи), градієнта температури (термодифузія) і градієнта загального тиску (фільтраційний масоперенос).

Механізм руху вологи в капілярно-пористих колоїдних тілах, до яких належить рослинна сільськогосподарська сировина, описують дифузією вологи в пористому твердому тілі. Для опису процесу дифузії використовують 1-й і 2-й закони Фіка.

Для однорідного ізотропного середовища закони Фіка мають вигляд:

1-й закон установлює величину швидкості проникнення дифузанта через одиницю поверхні деякого середовища як добуток градієнта концентрації дифузанта на сталу величину, що називається коефіцієнтом дифузії:

$$j = -D \times \text{grad}C = -D\nabla C, \quad (1.1)$$

де  $j$  – потік дифузанта через одиницю поверхні, моль/(м<sup>2</sup>×с);  $C$  – концентрація дифузанта, моль/м<sup>3</sup>;  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

2-й закон визначає накопичення дифузанта в елементарному об'ємі середовища як функцію часу:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \times \text{div}(\text{grad}C) = D\nabla^2 C \quad (1.2)$$

де  $\tau$  – час, с.

Коефіцієнт дифузії  $D$  являє собою співвідношення фізичних властивостей середовища, що сприяють і протидіють потоку маси, за аналогією з коефіцієнтом теплопровідності в рівнянні нестационарної теплопровідності. Одним із механізмів, що визначають інтенсивність дифузії, є термодифузія. За наявності від'ємного градієнта температури в середовищі потік маси збільшується, а за позитивного градієнта – зменшується.

Ґрунтуючись на першому законі Фіка, кінетичне рівняння масопереносу, що враховує концентраційну дифузію і термодифузію, для нескінченної плоскої пластини можна подати у вигляді:

$$\vec{i} = -k \times \rho_0 \times (\text{grad}(u) + \delta_t \times \text{grad}(t)) \quad (1.3)$$

де  $i$  – інтенсивність сушіння, кг/(м<sup>2</sup>×с);  $k$  – коефіцієнт масопровідності, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_0$  – густина абсолютно сухого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – фактичний вологовміст, кг/(кг сухого матеріалу);  $\delta_t$  – відносний коефіцієнт термодифузії, К<sup>-1</sup>;  $t$  – температура, °С.

Рух вологи в капілярно-пористому тілі здійснюється в рідкому стані та в стані пари. Для обох випадків збільшення температури в деякій області середовища сприяє збільшенню потенціалу руху вологи. У випадку рідини зі зростанням температури зменшується її в'язкість, що сприяє збільшенню капілярного струму, а також збільшується об'єм рідини, що призводить до зростання тиску в ділянці збільшення температури. У пароподібному середовищі збільшення температури також призводить до зростання тиску.

У процесі вологовидалення з високовологої сільськогосподарської рослинної сировини під час підведення теплового випромінювання тепла енергія витрачається на нагрівання вологи та сухої речовини поверхневого шару, тепловий потік углиб сировини та на випаровування вологи поверхневого шару в навколишнє середовище. Вологовміст поверхневого шару зменшується, частину об'єму поверхневого шару займає водяна пара, тим самим зменшується і теплоємність поверхневого шару. Швидкість нагріву поверхневого шару за постійного теплопідведення збільшується. Нагріта волога внутрішніх шарів сировини починає рухатися до поверхневого шару. В істотно більш нагрітій парі поверхневого шару збільшується тиск, що сприяє збільшенню інтенсивності випаровування в навколишнє середовище і перешкоджає руху вологи з внутрішніх шарів сировини до поверхні. Частка пари в поверхневому шарі за рахунок швидкого нагріву зростає, починає зростати і у внутрішніх шарах сировини, просуваючись до середини сировини. Дедалі більша кількість пари утворюється у внутрішніх шарах сировини. Вихід пари на поверхню сировини ускладнює клітинна структура капілярно-пористого тіла, а збільшення частки пари в поверхневому шарі та прилеглих до нього внутрішніх шарів погіршує передачу теплової енергії вглиб сировини. Інтенсивність вологовидалення із сировини знижується. Характерною є практично повна відсутність періоду постійної швидкості сушіння у сировини, що має форму близьку до сферичної, наприклад цілих ягід малини, винограду, скибочок яблук, персика, моркви, буряка тощо.

У разі припинення дії потоку теплового випромінювання на сировину, температура поверхневого шару сировини швидко знижується, температура й тиск пари в ньому падають, частина пари конденсується, умови для руху вологи з глибини сировини поліпшуються, вологовміст у масиві сировини вирівнюється за її об'ємом, поліпшуються умови й для передання теплової енергії вглиб сировини. Область інтенсивного пароутворення зміщується до поверхні, що полегшує вихід пари на поверхню і в навколишнє середовище. Відсутність



теплого потоку ззовні призводить до зниження температури сировини і як наслідок, інтенсивності пароутворення. Для відновлення інтенсивності вологовидалення із сировини необхідно відновити підведення теплової енергії до її поверхні.

Таким чином, наявність позитивного градієнта температури у вологому капілярно-пористому тілі погіршує умови для дифузії вологи до його межі, а наявність негативного градієнта сприяє цій дифузії. Мала інерційність і локальність джерел теплового випромінювання дає змогу реалізовувати осцилювальні або імпульсні теплові впливи на сировину, що плавно змінюються в часі, під час сушіння. У періоди опромінення поверхні сировини потоком теплового випромінювання градієнт температури в сировині стає додатним, що призводить до збільшення температури в масі сировини, а в період, коли потік теплового випромінювання не надходить на поверхню сировини, градієнт температури в сировині стає від'ємним, що сприяє видаленню вологи із сировини в навколишнє середовище, завдяки однаковому напрямку потоку масопровідності та термодифузії.

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень впливу термодифузії за осцилюючих режимів інфрачервоного сушіння отримано, що термодифузія є помітною, проте її внесок у кінетику сушіння є невеликим і становить не більше 5 %. При цьому слід зазначити, що об'єктом виконаних досліджень було насіння, зокрема насіння цибулі, дані по десорбційній рівновазі для якого використані в математичних моделях аналізу термодифузії. Малі геометричні розміри насіння та особливості його клітинної структури могли бути причиною малого ефекту термодифузії в процесі імпульсного інфрачервоного сушіння.

Таким чином, імпульсні режими інфрачервоного сушіння можуть бути додатковим джерелом інтенсифікації процесу сушіння рослинної сировини з високим вмістом біологічно активних речовин, що сприятливо позначиться на ступені їх збереження в продукті сушіння.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Компактний багатоярусний пристрій інфрачервоного сушіння рослинної сировини

Об'єктом дослідження є багатоярусний шафований пристрій динамічного інфрачервоного сушіння сільськогосподарської рослинної сировини, схему якого представлено на рисунку 2.1. Пристрій складається із сушильної камери 1 і розташованих у камері ярусами сітчастих лотків 2 для сировини. На рухомій каретці 4, забезпеченій керованим приводом, між лотками встановлено лінійні інфрачервоні (ІЧ) випромінювачі 3 з відкритою спіраллю трубчастої форми так, що кожний лоток має над собою і під собою інфрачервоний випромінювач. Каретка має можливість переміщатися зворотно-поступально вздовж лотків по напрямних 5. У донній частині камери виконані отвори 6 для забору повітря в об'єм камери, а у верхній частині камери для видалення з об'єму камери випаровуваної вологи встановлені витяжні вентилятори 7.

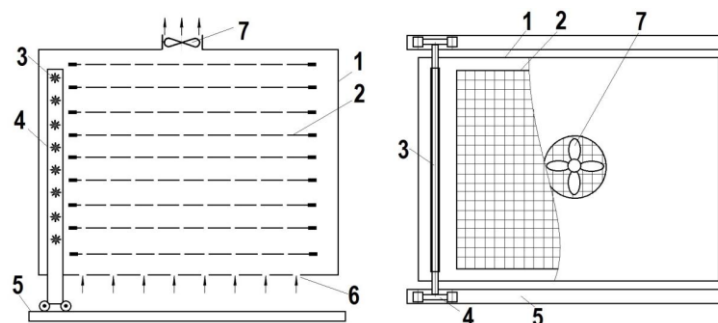


Рис. 2.1. Схема багатоярусного шафового пристрою динамічного інфрачервоного сушіння сільськогосподарської рослинної сировини: 1 – сушильна камера; 2 – сітчасті лотки для сировини; 3 – інфрачервоні

випромінювачі; 4 – рухома каретка; 5 – напрямні; 6 – отвори для забору повітря в об'єм камери; 7 – витяжні вентилятори.

Лінійні трубчасті випромінювачі, що рухаються між лотками, забезпечують рівномірне підведення теплоти до всієї поверхні висушуваної сировини як зверху, так і знизу. Відстань між лотками обмежується зовнішнім діаметром випромінювача і товщиною шару сировини на лотку і може становити не більше 40 мм. Рух випромінювача як локального джерела нагріву забезпечує динамічні умови передавання теплової енергії поверхні сировини, реалізуючи тим самим теплові хвилі або імпульси як механізм інтенсифікації процесу сушіння.

## **2.2 Експериментальна камера динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини**

Схему експериментальної камери динамічного інфрачервоного сушіння представлено на рис. 2.2.

На колісній основі 1 встановлено каркас 2 для розміщення лотків 3 із сировиною. На основі 1 встановлено напрямні 4 для переміщення каретки 5. На візку 5 закріплена рама 6 зі встановленими на ній інфрачервоними лінійними випромінювачами 7, розміщеними між ярусами з лотками 3. У донній частині камери на основі 1 встановлено розподілений конвективний нагрівач 8, у даху камери встановлено витяжні вентилятори 9. Рух каретки 5 здійснюється мотор-редуктором 10, що передає крутний момент на кругову ланцюгову передачу 11. Каретка 5 і ланцюг ланцюгової передачі 11 з'єднані повзунком, що забезпечує рух каретки разом із ланцюгом.

Відповідно до схеми розроблено конструкцію та виготовлено експериментальну камеру динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини. На рис. 2.3 *a* представлено зображення каркаса камери, встановленого на колісній основі, і пристрою переміщення каретки з інфрачервоними випромінювачами.

На рис. 2.3 б представлено зображення органів живлення та керування роботою експериментальної камери динамічного інфрачервоного сушіння. Мотор-редуктор 1 живиться електроенергією через частотний регулятор 2 і пристрій 3 захисту від перекосу фаз електричного живлення. Електричне живлення інфрачервоних випромінювачів керується контролером температури 4, про ввімкнене живлення випромінювачів сигналізує лампа 7.

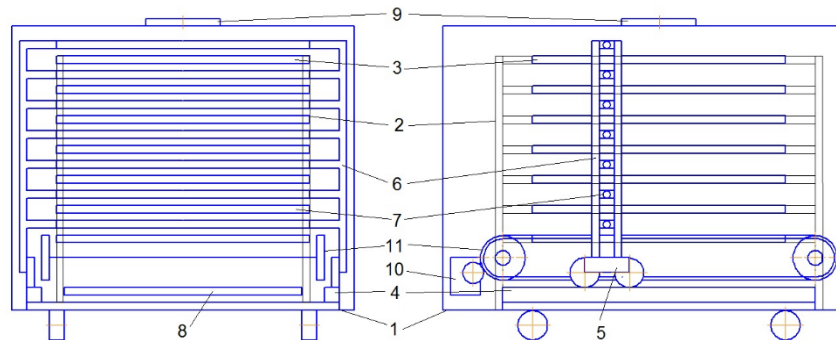
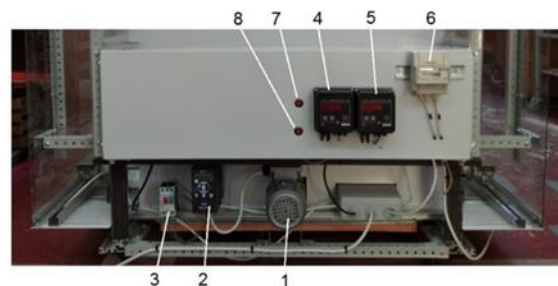


Рис. 2.2. Схема експериментальної камери динамічного інфрачервоного сушіння: 1 – основа; 2 – каркас для розміщення лотків; 3 – лотки із сировиною; 4 – напрямні; 5 – каретка; 6 – рама; 7 – інфрачервоні лінійні випромінювачі; 8 – конвективний нагрівач; 9 – витяжні вентилятори; 10 – мотор-редуктор; 11 – ланцюгова передача.



а) каркас камери та пристрій переміщення інфрачервоних випромінювачів: 1 – основа; 2 – каркас для розміщення лотків; 3 – лотки із сировиною; 4 – напрямні; 5 – каретка; 6 – рама; 7 – інфрачервоні лінійні випромінювачі; 8 – конвективний нагрівач; 9 – витяжні вентилятори; 10 – мотор-редуктор; 11 –



б) органи живлення та керування роботою експериментальної камери динамічного інфрачервоного сушіння: 1 – мотор-редуктор; 2 – частотний регулятор; 3 – пристрій захисту від перекосу фаз електричного живлення; 4 – контролер температури; 5 – контролер температури; 6 – однофазний лічильник

ланцюгова передача.

електроенергії; 7, 8 – лампа.

Рис. 2.3. Експериментальна установка.

Вимірювальний сигнал температури на контролер подає термопара типу К (хромель-алюмель) з відкритим робочим спаєм діаметром 0,3 – 0,35 мм, який розміщують у сировині на глибині 3 – 5 мм.

Електричне живлення конвективного нагрівача керується контролером температури 5, про ввімкнене живлення нагрівача сигналізує лампа 8. Вимірювальний сигнал температури на контролер подає термопара типу К (хромель-алюмель) з відкритим робочим спаєм діаметром 0,3 – 0,35 мм, що встановлений у серединній частині нагрівача на висоті 50 мм від площини розміщення спірального нагрівального елемента. Витрата електроенергії на живлення конвективного нагрівача враховується однофазним лічильником електроенергії 6.

На рис. 2.4 представлено загальний вигляд експериментальної камери динамічного інфрачервоного сушіння. Камера містить 8 ярусів, відстань між якими становить 65 мм. На кожному ярусі розміщуються два сітчасті лотки розмірами 1000×650 мм, тобто площа розміщення сировини на кожному ярусі становить 1,3 м<sup>2</sup>. Між ярусами встановлено ІЧ випромінювачі, виконані з фехралевого спірального дроту, поміщеного в трубку кварцового скла діаметром 10 мм. Електрична потужність ІЧ випромінювача – 1000 Вт. Довжина ІЧ випромінювача становить 1000 мм.

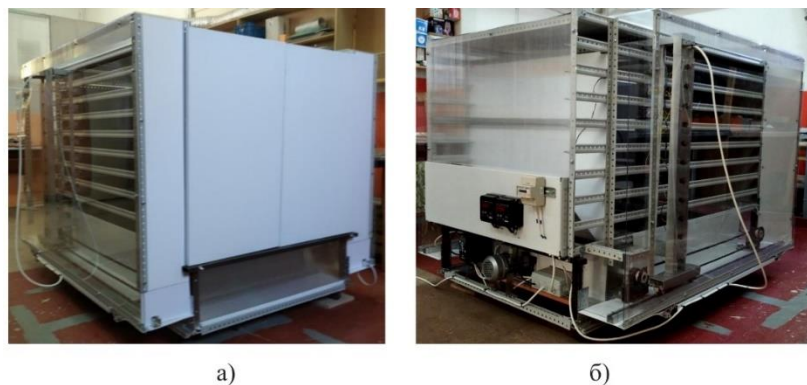


Рис. 2.4. Загальний вигляд компактного шафового пристрою динамічного інфрачервоного сушіння спереду зліва (а) і ззаду праворуч (б).

Для зниження потоку теплового випромінювання від ІЧ випромінювача за межі лотків із сировиною на випромінювачах встановлено плоскі дзеркально відбивні екрани так, що відбите випромінювання потрапляє на поверхню лотків із сировиною. Екрани виконані з листового аляноду (дзеркально полірованого анодованого листового алюмінію) товщиною 0,4 мм. Довжина екрана становить 1000 мм, висота – 40 мм. Підключення кожного ІЧ випромінювача до мережі електричного живлення автономне, що дає змогу використовувати тільки необхідну для виконуваного процесу сушіння кількість випромінювачів у разі неповного завантаження пристрою сировиною.

На 5-ти ярусах встановлено по 1 випромінювачу (рис. 2.5 а), а на 3-х верхніх ярусах встановлено по 2 випромінювачі, як показано на рис. 2.5 б.

Кожен із випромінювачів, встановлених у парі, живиться автономно, що дає змогу досліджувати вплив теплової величини потужності випромінювача на енергетичні показники пристрою сушіння.

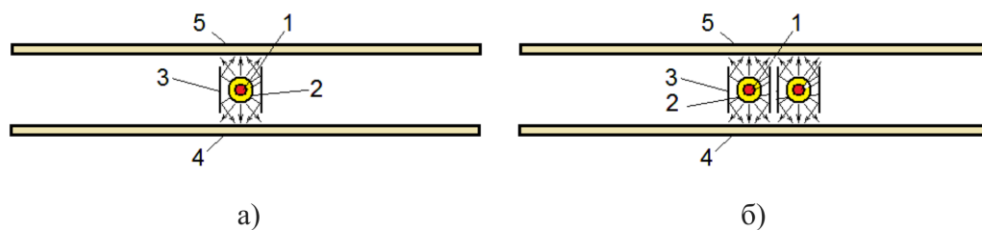


Рис. 2.5. Схема ІЧ випромінювача: 1 – спіраль ІЧ випромінювача; 2 – трубка з кварцового скла; 3 – дзеркальний відбивач; 4 – нижній лоток; 5 – верхній лоток.

Як витяжні вентилятори в пристрої використано 4 вентилятори FD8038A2HS споживаною потужністю не більш ніж 16 Вт і об'ємною продуктивністю до 40 м<sup>3</sup>/год.

### 2.3 Системи вимірювання параметрів процесу динамічного інфрачервоного сушіння

Для вимірювання температур і теплових потоків використовують безконтактні пірометри та тепловізори, малогабаритні контактні вимірювальні перетворювачі - термістори, термометри опору та термопари. Для вимірювання вологості застосовують ємнісні вимірювальні перетворювачі, для визначення вологості речовин використовують вагові методи із застосуванням тензометричних цифрових ваг. Електричні величини вимірюють індукційними перетворювачами сили струму та витрати електроенергії.

Для виконання експериментального дослідження ефективності динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини використано такі контрольні-вимірювальні прилади та установки:

1. Комп'ютерна система вимірювання температури під час сушіння з використанням контактних вимірювальних перетворювачів температури - термопар хромель-алюмель типу К з відкритим спаєм діаметром 0,3 - 0,35 мм, спеціалізованого 8-ми каналного контролера ИТ-8ТП-RS, що забезпечує одночасне вимірювання температури 8-ма перетворювачами з частотою 1-2 Гц, персонального комп'ютера зі встановленою на ньому програмою, яка забезпечує візуальне спостереження та запис у пам'ять комп'ютера показань перетворювачів температури;

2. Тепловізор Testo 882 з матрицею розміром 320×240 пікселів для вимірювання розподілу температури на поверхні сировини, розміщеної на лотку, під час сушіння;

3. Сухожарова шафа з системою терморегуляції для визначення маси сухої речовини сировини і продукту сушіння з метою визначення вихідної вологості висушеної сировини;

4. Ваги для визначення маси сировини і маси продукту сушіння;

5. Лічильники витрачання електроенергії в однофазній і трифазній мережах змінного струму.

Експериментальний сітчастий лоток. Експериментальний сітчастий лоток використовували для одночасного вимірювання температури сировини,

розміщеної в різних зонах лотка. Схему розташування робочих спаїв термопар на експериментальному лотку представлено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Розташування робочих спаїв термопар на експериментальному лотку: 1 - 7 – термопари.

Експериментальний сітчастий лоток являє собою лоток розмірами 1000×500 мм зі встановленими на ньому 7-ма вимірювальними перетворювачами температури (термопари типу К з відкритим спаєм діаметром 0,35 мм). Відвідні дроти термопар закріплені так, що робочий спай термопар може розташовуватися над поверхнею сітки лотка на відстані до 20 мм. Це дає змогу наколювати на робочий спай скибочку сировини, заглиблюючи спай на різну глибину.

Для коректного визначення розподілу теплового впливу поверхнею лотка скибочки мають бути однакової товщини, а спаї термопар мають бути заглиблені в скибочку на однакову глибину.

Вимірювання температури сировини в ході сушіння виконується за допомогою описаної вище комп'ютерної системи вимірювання температури в ході сушіння з використанням контактних вимірювальних перетворювачів температури. Загальний вигляд контролера і схема перетворення сигналу вимірювальної інформації наведені на рис. 2.7.



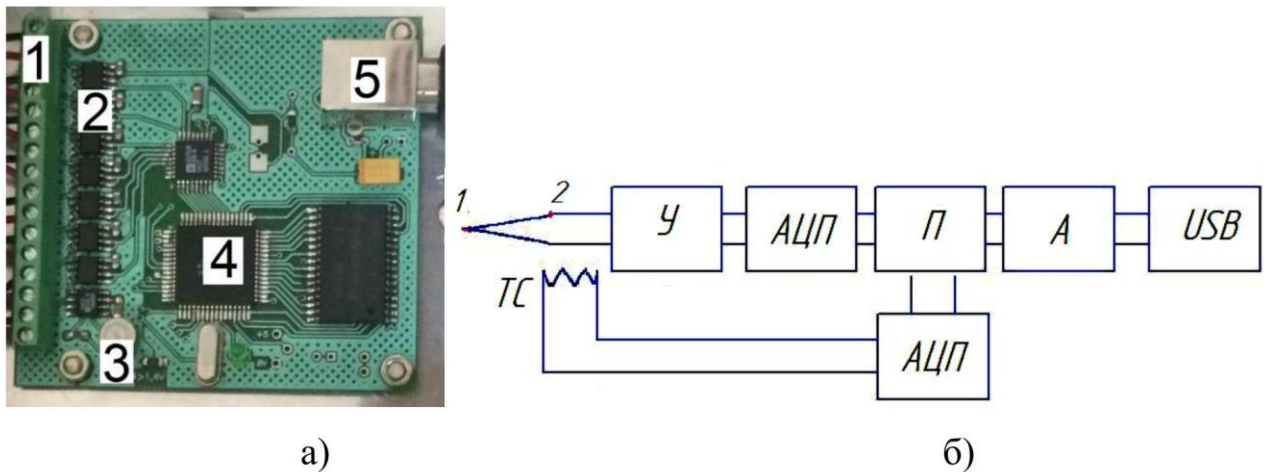


Рис. 2.7. Загальний вигляд контролера і схема перетворення сигналу вимірювальної інформації: 1 – колодка підключення термопар; 2 – аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) з підсилювачами; 3 – термістор вимірювання температури холодних роз'ємів; 4 – мікропроцесор; 5 – USB-роз'єм.

Основними елементами контролера ИТ-8ТП-RS (рис. 3.6, а) є колодка підключення термопар (колодка холодних роз'ємів) 1, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) з підсилювачами 2, термістор вимірювання температури холодних роз'ємів 3, мікропроцесор 4, USB-роз'єм 5.

На схемі перетворення сигналу вимірювальної інформації (рис. 3.6, б) представлено функціональний зв'язок елементів контролера: 1 – робочий спай термопар; 2 – холодний роз'єм (холодний спай); У – підсилювач сигналу; АЦП – 24 розрядний аналого-цифровий перетворювач; П – процесор; А – адаптер; USB – послідовний інтерфейс для під'єднання периферійних пристроїв до обчислювальної техніки; ТС – термометр опору.

Для отримання достовірної експериментальної інформації за допомогою контролера і термопар попередньо виконано пряме градуювання кожного каналу схеми, представленої на рисунку 3.6, б. Для градуювання всі робочі спай термопар розміщувалися навколо ртутної колби зразкового ртутного термометра зі шкалою від 0 до 100 °С. Колбу з робочими спаями поміщали в скляну пробірку, яку потім заповнювали попередньо прожареним дрібнодисперсним кварцовим піском. Пробірку з вимірювальними перетворювачами поміщали в

ємність із водою об'ємом 5-7 літрів. Ємність нагрівали до кипіння, режим кипіння витримували протягом 20-25 хвилин, потім ємність охолоджували в природних умовах. Значення температури зразкового термометра і температур, що реєструються каналами контролера, реєстрували до повного охолодження води в ємності.

Зареєстровані показання каналів контролера коригували настроювальними коефіцієнтами програми контролера так, щоб зареєстровані каналами контролера значення температур збіглися з температурою зразкового термометра. Після коригування настроювальних коефіцієнтів програми контролера повторювали пряме градування. У результаті такого градування отримано, що розкид показань каналів контролера не перевищує  $\pm 0,1$  °С.

Тепловізор Testo 882. Тепловізор Testo 882 (рис. 2.8) з матрицею розміром  $320 \times 240$  пікселів дає змогу одночасно фіксувати розподіл температури поверхнею об'єкта, за яким ведеться спостереження, та оптичне зображення об'єкта, що дає змогу коректно зіставити значення температури з місцем розташування частини об'єкта, за яким ведеться спостереження.

Програмне забезпечення тепловізора дає змогу зберігати матрицю значень температури в текстовому файлі для подальшого опрацювання отриманої термограми засобами опрацювання даних прикладними програмами, наприклад, табличним процесором MS Excel або програмою математичних та інженерних розрахунків Mathcad.

Точність результатів вимірювання тепловізором залежить від заданих значень ступеня чорноти спостережуваного об'єкта і температури навколишнього середовища. Для виконання вимірювань поверхні рослинної сировини використано значення ступеня чорноти 0,8 і температуру довкілля 20°C, рекомендовані посібником з експлуатації тепловізора під час вимірювань поверхонь рослинного покриву.

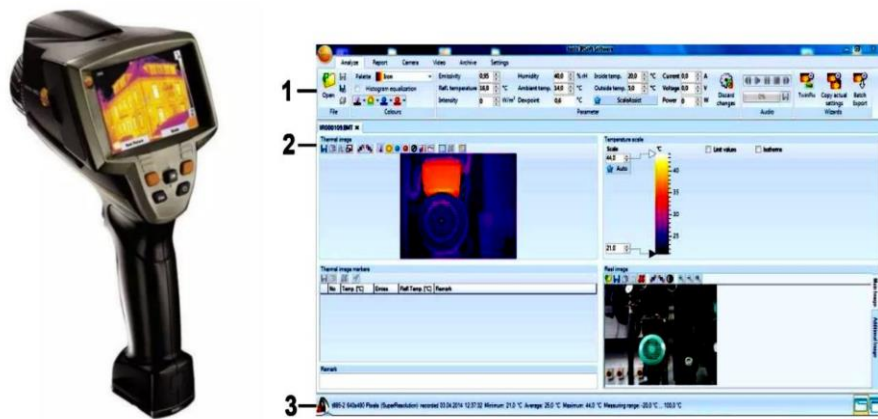


Рис. 2.8. Тепловізор Testo 882 і його користувацький інтерфейс: 1 – панель інструментів; 2 – робоча область; 3 – рядок стану

Лабораторна установка для визначення кількості вологи в сировині та продукті сушіння. Лабораторна установка (рис. 2.9) для визначення кількості вологи в сировині та продукті сушіння є електричною міні-піччю Saturn ST-ES1075 з двостороннім режимом нагріву (трубчасті нагрівальні елементи або ТЕНи розміщені біля верхньої та нижньої стінок внутрішнього об'єму печі). Для забезпечення контрольованого термостатування об'єму печі всередині об'єму розміщено термопару типу К з відкритим робочим спаєм діаметром 0,35 мм, сигнал від якої надходить до вимірювача-регулятора ТРМ-1, що керує подачею електричного живлення на нагрівальні елементи печі за допомогою твердотільного електронного реле. Досушування продукту сушіння в печі виконується за температури в об'ємі печі  $105 \pm 1$  °C протягом 3 – 4 годин.



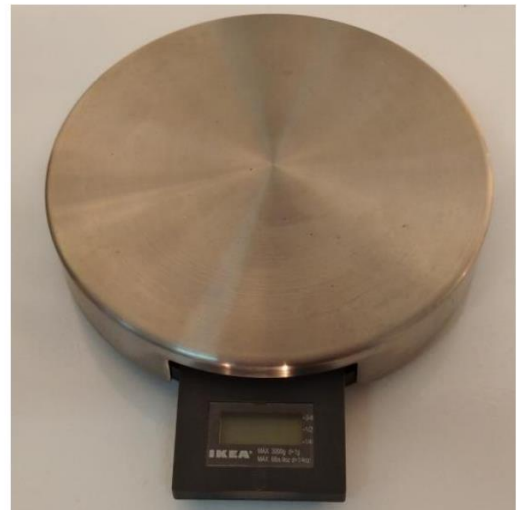
Рис. 2.9. Лабораторна установка для визначення кількості вологи в сировині та продукті сушіння: 1 – ємності зі зразками; 2 – термопара; 3 – твердотільне реле; 4 – регулятор ТРМ1.

Ваги для визначення маси сировини та маси продукту сушіння. Для визначення маси використані тензометричні цифрові ваги з діапазонами виміру 0 – 20 кг (мінімальна маса – 0,1 кг, ціна поділки шкали – 1 грам), 0 – 5 кг (мінімальна маса – 0,01 кг, ціна поділки шкали – 1 грам), 0 – 0,20 кг (мінімальна маса – 0,001 кг, ціна поділки шкали – 0,1 грам) (рис. 3.9). Усі ваги забезпечені можливістю встановлення нуля показань та обліку маси тари.

Ваги для визначення маси сировини та маси продукту сушіння. Для визначення маси використані тензометричні цифрові ваги з діапазонами виміру 0 – 20 кг (мінімальна маса – 0,1 кг, ціна поділки шкали – 1 грам), 0 – 5 кг (мінімальна маса – 0,01 кг, ціна поділки шкали – 1 грам), 0 – 0,20 кг (мінімальна маса – 0,001 кг, ціна поділки шкали – 0,1 грам) (рис. 3.10). Усі ваги забезпечені можливістю встановлення нуля показань та обліку маси тари.



а)



б)

Рис. 2.10. Тензометричні ваги: а) 0 – 5 кг (мінімальна маса – 0,01 кг, ціна поділки шкали – 1 грам); б) 0 – 0,20 кг (мінімальна маса – 0,001 кг, ціна поділки шкали – 0,1 грам)



а)



б)

Рис. 2.11. Тензометричні ваги: а) 0 – 5 кг (мінімальна маса – 0,01 кг, ціна поділки шкали – 1 грам); б) 0 - 0,20 кг (мінімальна маса – 0,001 кг, ціна поділки шкали – 0,1 грам).

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Експериментальне визначення енергетичних витрат і тривалості сушіння виноградної вижимки

Експериментальне дослідження процесу сушіння виконували при сушінні виноградної вижимки, отриманої в результаті пресування свіжого винограду сорту каберне.

Під час експерименту використовували один (верхній) ярус пристрою динамічного інфрачервоного сушіння, для сушіння сировини вмикали по одному ІЧ випромінювачу, що були розміщені над та під лотками з сировиною (рис. 3.5, а).

Для порівняння характеристик процесу сушіння використовували компактний пристрій конвективного сушіння Електросушарка ЕСБ споживаною потужністю 1000 Вт [9].

Пристрій Електросушарка ЕСБ (рис. 3.1) містить 5 кругових лотків-решіток зовнішнім діаметром 388 мм, розміщених один на одному на відстані 40 мм. Пристрій оснащений автоматичним релейним регулятором температури агента сушіння в межах від 40 до 60 °С і забезпечує досить високий рівень рівномірності процесу сушіння в об'ємі пристрою завдяки радіальному поданню агента сушіння від периферичного перерізу лотка до його центру.

Сушіння здійснювали паралельно в обох пристроях протягом 22 годин для 3-х температурних режимів: 40 °С, 50 °С, 60 °С. Для створення ідентичних умов сушіння сировину розміщували на лотках обох пристроїв так, щоб маса сировини на одиницю площі лотків пристроїв була однаковою: на лоток конвективного пристрою розміщували 0,8 кг сировини, а на лоток інфрачервоного пристрою - 4,5 кг сировини. Швидкість руху каретки з ІЧ випромінювачами в ході сушіння становила 0,1 м/с.

Показання маси і витрати електроенергії реєстрували 1 раз на годину. Конвективний пристрій сушіння під час експериментів розташовувався на вагах, що давало змогу реєструвати зміну маси, не втручаючись у роботу пристрою. Для реєстрації значень маси сировини в пристрої ІЧ сушіння лотки виймали з пристрою і розміщували на вагах.

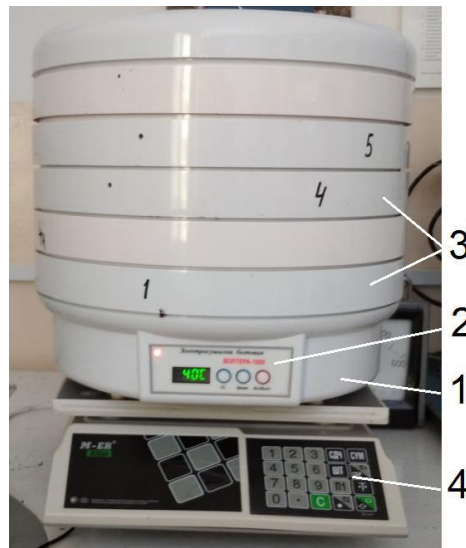


Рис. 3.1. Пристрій конвективного сушіння на тензOMETричних вагах: 1 – корпус пристрою; 2 – панель керування режимами сушіння; 3 – кругові сітчасті лотки; 4 – ваги тензOMETричні.

Результати експериментального дослідження характеристик процесу динамічного інфрачервоного сушіння в компактному пристрої. Для кожного температурного режиму виконано по 4 сушіння. У результаті отримано залежності убутку маси сировини та витрат енергії від тривалості сушіння.

На рис. 3.2 наведено залежності зменшення маси сировини під час сушіння в конвективному та інфрачервоному пристроях.

На рис. 3.3 наведено залежності витрат енергії на випаровування 1 кг вологи під час сушіння в конвективному та інфрачервоному пристроях.

Після сушіння досушуванням продукту інфрачервоного сушіння в сухожаровій шафі визначили масу сухої речовини  $i$ , відповідно, кінцеву вологість продукту сушіння  $\varphi_p$  і вихідну вологість сировини  $\varphi_0$ . Вологість сировини становила  $69 \pm 1,5$  %. Кінцева вологість продукту після інфрачервоного

сушіння протягом 22 годин за 60 °C становила  $\varphi_{п} = 6,2 \pm 0,3$  %, за 50 °C  $\varphi_{п} = 12,1 \pm 0,35$  %, за 40 °C  $\varphi_{п} = 28,1 \pm 0,43$  %.

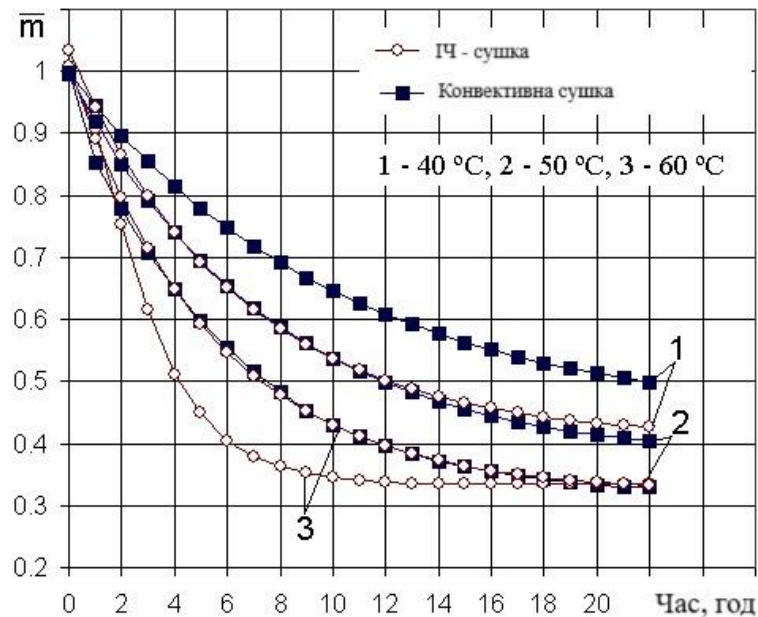


Рис. 3.2. Залежності зменшення маси сировини під час сушіння від тривалості сушіння

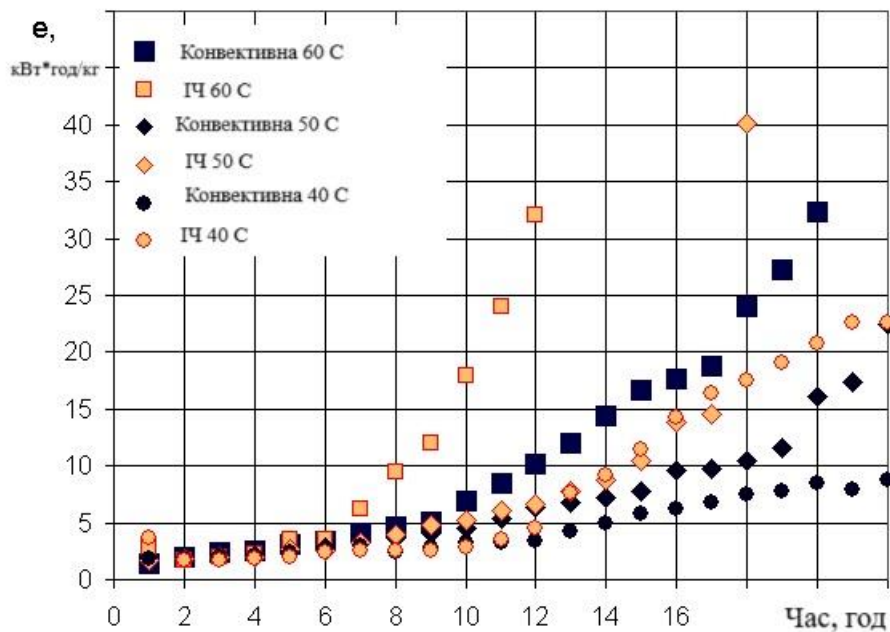


Рис. 3.3. Залежності витрат енергії на випаровування 1 кг води від тривалості сушіння.

За даними вихідної вологості сировини та убитку маси розраховано криві сушіння (рис. 3.4).



Порівняння витрат енергії на процес сушіння і тривалості сушіння виконували для фіксованих значень вологості продукту сушіння  $\phi_p$ : для сушіння за температури  $60\text{ }^\circ\text{C}$  -  $\phi_p = 7\%$  (вологість, що забезпечує тривале збереження в продукті сушіння біологічно активних речовин), для сушіння за температури  $50\text{ }^\circ\text{C}$  -  $\phi_p = 25\%$  (мінімально досягнута вологість при конвективному сушінні на даному режимі), для сушіння за температури  $40\text{ }^\circ\text{C}$  -  $\phi_p = 36\%$  (мінімально досягнута вологість при конвективному сушінні на даному режимі). У таблиці 3.1 наведено усереднені величини енергетичних витрат процесу сушіння на 1 кг сировини і на 1 кг випаруваної води, а також час сушіння для заданих величин вологості продукту сушіння.

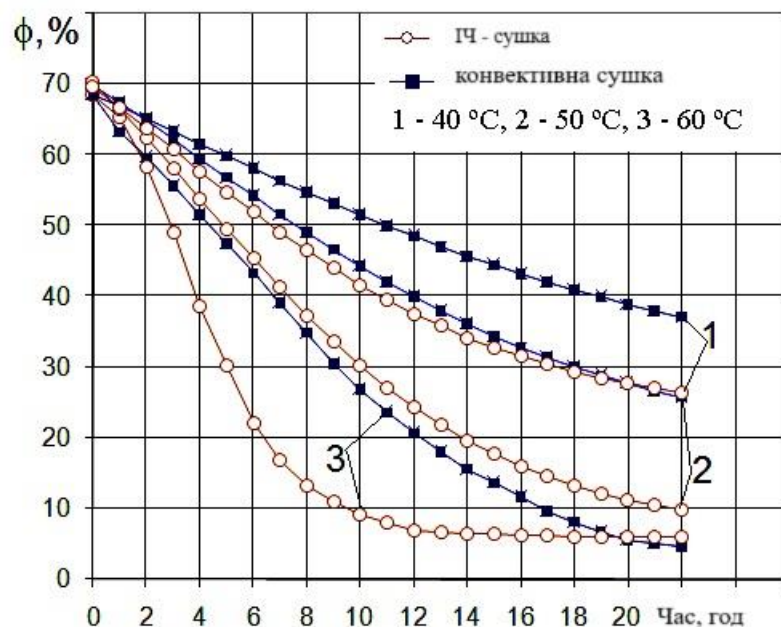


Рис. 3.4. Криві сушіння виноградної вижимки в інфрачервоному та конвективному компактних пристроях.

Як випливає з рис. 3.4 і таблиці 3.1, динамічне інфрачервоне сушіння в компактному пристрої дає змогу отримати продукт сушіння виноградної вижимки, що має вихідну вологість  $70\%$ , вологістю  $7\%$  за 13 годин сушіння за температури сировини під час сушіння, що дорівнює  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому витрати енергії на процес сушіння становлять  $2,314\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$  сировини або  $3,510\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$  випаровуваної води. При зниженні температури сировини під час сушіння до  $50\text{ }^\circ\text{C}$  динамічне інфрачервоне сушіння в компактному пристрої

протягом 22 годин дає змогу досягти вологості продукту сушіння, що дорівнює 10%, при цьому витрати енергії на процес сушіння становлять 2,456 кВт-год/кг сировини або 3,930 кВт-год/кг випаровуваної вологи. Таким чином, зниження температури сировини в ході сушіння призводить не тільки до збільшення тривалості процесу сушіння, а й до збільшення питомих витрат енергії на процес сушіння.

Граничні відхилення наведено для довірчої ймовірності  $P_{дов} = 0,95$ .

На рис. 3.5 наведено діаграми відношень витрат енергії та часу інфрачервоного сушіння до витрат енергії та часу конвективного сушіння.

Таблиця 3.1 – Параметри ефективних режимів сушіння для даних на рис. 3.14.

фп, %	Загальні затрати, кВт·год/кг сировини			Загальні затрати, кВт·год/кг вологи			Час сушки, год		
	60 °C	50 °C	40 °C	60 °C	50 °C	40 °C	60 °C	50 °C	40 °C
<b>конвективне сушіння</b>									
7	2,949 ±0,047	–	–	4,410 ±0,057	–	–	19 ±0,3	–	–
25	1,768 ±0,029	2,321 ±0,040	–	2,650 ±0,051	3,870 ±0,052	–	11 ±0,3	21 ±0,3	–
36	1,309 ±0,031	1,406 ±0,018	1,649	1,954 ±0,032	2,349 ±0,033	3,250 ±0,058	8 ±0,2	12 ±0,2	22 ±0,1
<b>інфрачервона сушка</b>									
7	2,315 ±0,048	–	–	3,512 ±0,059	–	–	14 ±0,1	–	–
25	1,432 ±0,034	1,625 ±0,040	–	2,169 ±0,041	2,599 ±0,040	–	7 ±0,2	14 ±0,1	–
36	1,048 ±0,021	1,051 ±0,020	1,194 ±0,022	1,591 ±0,031	1,681 ±0,046	2,331 ±0,044	5 ±0,2	8 ±0,1	13 ±0,1

Порівняно із сушінням у конвективному компактному пристрої динамічне інфрачервоне сушіння є більш ефективним як за питомими витратами енергії, так і за тривалістю сушіння. Так, при сушінні за температури сировини 60 °C питомі витрати інфрачервоного сушіння на 20 % нижчі, ніж за конвективного, а тривалість сушіння менша на 32 %. При зниженні температури сировини в ході сушіння різниця у витратах енергії та тривалості сушіння зростає.

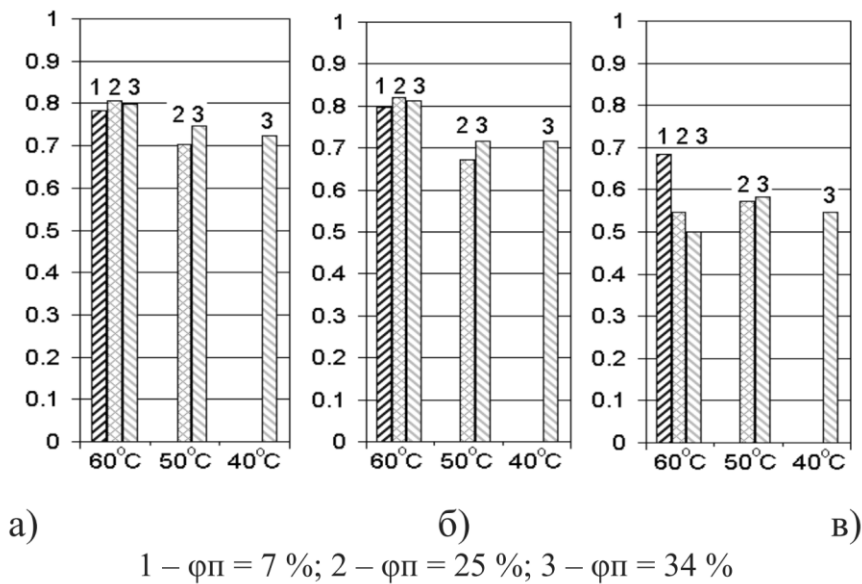


Рис. 3.5. Відношення витрат енергії та часу інфрачервоного сушіння до витрат енергії та часу конвективного сушіння: витрати енергії в кВт-год/кг сировини (а), витрати енергії в кВт-год/кг випаровуваної вологи (б), час сушіння (в) для заданих величин вологості продукту сушіння.

### 3.2 Експериментальне дослідження рівномірності теплового впливу на сировину під час сушіння

Експериментальне дослідження рівномірності теплового впливу на сировину під час сушіння виконано з використанням експериментального лотка зі встановленими на ньому контактними вимірювальними перетворювачами та тепловізора Testo 882.

Рівномірність визначали під час розігрівання сировини в процесі сушіння і в періоді підтримання заданої температури сировини релейним регулятором.

Для забезпечення умов, що забезпечують однакову теплову реакцію сировини на інфрачервоне випромінювання, що на неї впливає, використані скибочки сировини однакової товщини. Як такі скибочки використані скибочки яблук, нарізані на скиборізці з сіткою ножів, встановлених на відстані один від одного, що дорівнює 4 мм. Використано яблука сорту Семеренко, що мають дрібнозернисту, дуже щільну і соковиту м'якоть. Скибочки розкладали щільно

одна до одної в один шар на поверхні лотка, що забезпечувало однакову теплову дію інфрачервоного випромінювання на нижню і верхню поверхні кожної скибочки.

Визначення рівномірності з використанням експериментального лотка виконано в експериментальній камері динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини. Експериментальний лоток встановлювали на верхньому ярусі з боку завантаження лотків. В експерименті використано режими двостороннього нагрівання сировини одним і двома випромінювачами (рис. 3.5). Швидкість руху каретки з випромінювачами становила 0,1 м/с, що забезпечувало період теплової дії випромінювачів на сировину, що дорівнював 25 секундам.

Робочі спаї термопар експериментального лотка встановлювали, заглиблюючи їх у середину торцевої поверхні скибочки, висота якої становить 4 мм, на глибину 3 - 5 мм.

Виконано 5 сушінь за використання двостороннього нагріву, за якого використано по одному ІЧ випромінювачу зверху та знизу лотка, і 4 сушіння за використання двостороннього нагріву, за якого використано по два ІЧ випромінювачі зверху та знизу лотка.

На рис. 3.6 наведено термограму процесу сушіння в разі використання режиму двостороннього нагріву двома випромінювачами, розташованими над і під лотком із сировиною. На термограмі відображено масиви значень температури протягом першої години сушіння за обмеження температури під час сушіння величиною 40 °С.

На рис. 3.7 наведено термограму процесу сушіння за використання режиму двостороннього нагріву двома випромінювачами, розташованими над і під лотком із сировиною з обмеженням температури 50 °С протягом періоду релейного регулювання температури в сировині.

Позначення на рисунках масивів температур  $M<1>$  ...  $M<7>$  відповідає номерам місць розташування робочих спаїв термопар відповідно до рис. 3.6.

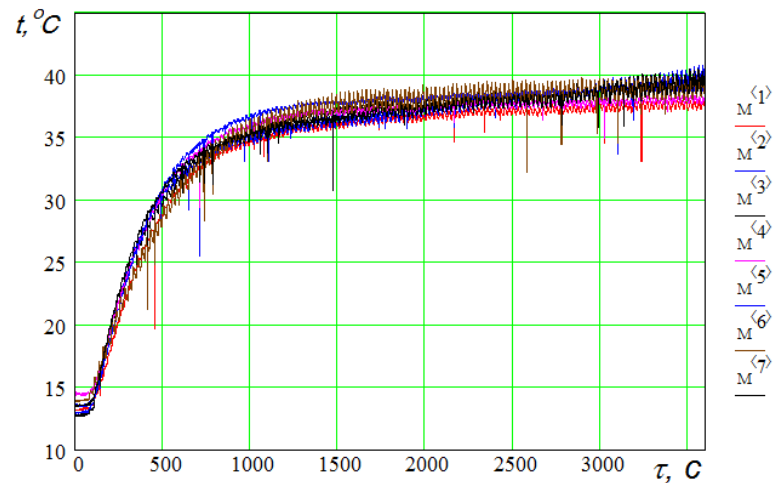


Рис. 3.6. Термограма початкового періоду процесу сушіння за обмеження температури 40 °С

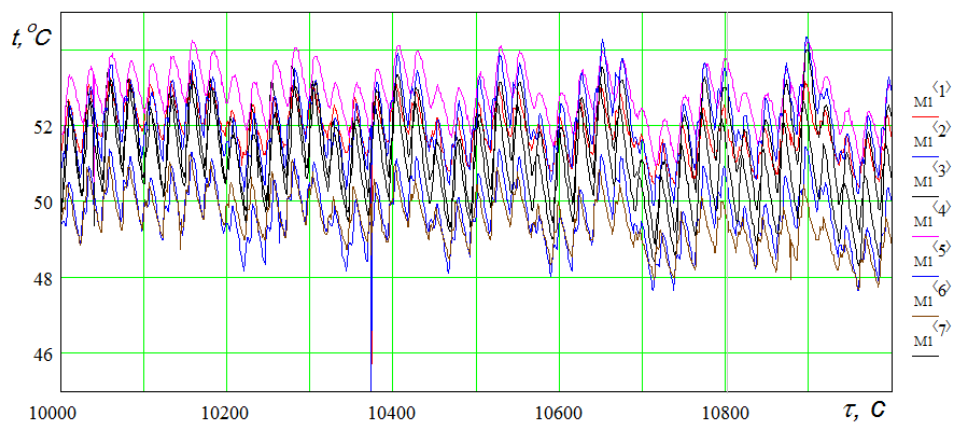


Рис. 3.7. Термограма процесу сушіння в період релейного регулювання за обмеження температури 50 °С

При цьому спаї з номерами 3 і 4 розташовані ближче до сторони завантаження пристрою сушіння, тепла дія на яку чиниться як подвійна з періодом 25 секунд. Спаї 5 і 6 розташовані ближче до середини ходу каретки, тепла дія на цю зону лотка виявляється як одинарна з періодом 12,5 секунди.

Графіки зміни температури під час сушіння на малюнку 3.18 чітко демонструють макроколивання температури, спричинені релейним регулюванням температури сировини під час сушіння, і мікроколивання, спричинені динамічним тепловим впливом на сировину інфрачервоних випромінювачів, що рухаються над поверхнею сировини.

Аналіз термограм засвідчив, що найбільші значення температур спостерігаються в місцях розташування термопар із номерами 3 і 4, а найменші значення – у місцях розташування термопар із номерами 1 і 6.

У таблиці 3.2 наведені усереднені значення нерівномірності температури по поверхні експериментального лотка під час сушіння.

Таблиця 3.2 – Нерівномірність температури сировини під час динамічного інфрачервоного сушіння

№	Середнє значення температури сировини, °С	Відхилення температури від середнього значення, °С	
		один ІЧ випромінювач	два ІЧ випромінювача
1	25±0,41	±0,859	±1,019
2	30±0,39	±0,879	±1,209
3	35±0,38	±0,739	±0,809
4	40±0,29	±1,630	±1,429
5	45±0,69	–	±1,830
6	50±0,44	–	±2,121

Граничні відхилення наведено для довірчої ймовірності  $P_{\text{дов}} = 0,95$ .

Отримані дані дають змогу судити про величину нерівномірності розподілу температури, але не дають змоги оцінити цілісну картину нерівномірності.

Для з'ясування характеру нерівномірності температури по поверхні лотка виконано експериментальне визначення нерівномірності з використанням тепловізора Testo 882. Для порівняння ступеня нерівномірності виконано сушіння в пристрої динамічного інфрачервоного сушіння і шафовому пристрої інфрачервоного сушіння.

Як сировину використано скибочки яблук сорту Семеренко, як описано вище в цьому розділі.

Сушіння здійснювали паралельно в обох пристроях. Для вимірювання розподілу температури лотки виймали з пристроїв і розміщували на теплоізольованій поверхні, що має кімнатну температуру  $21 \pm 1,5$  °С (рис. 3.18). Вимірювання виконували в моменти часу, коли показання температурного

контролера пристроїв реєстрували значення температури  $t_k$ , що дорівнювали 35 °С, 40 °С, 45 °С і 50 °С.



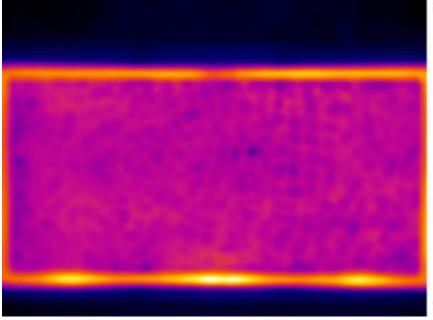
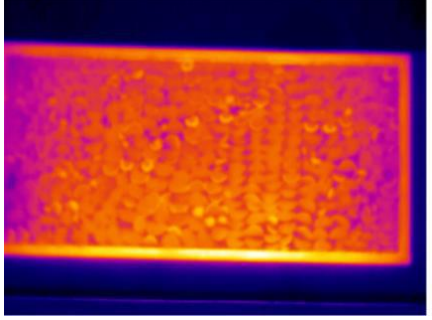
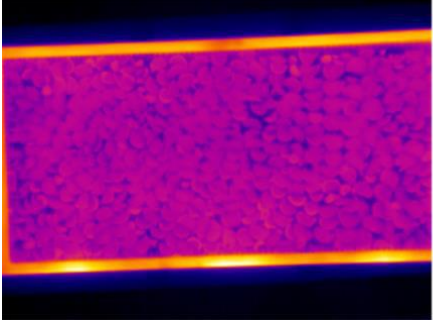
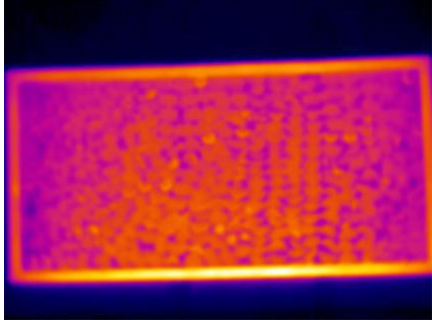
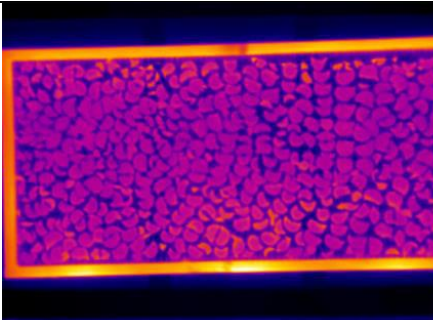
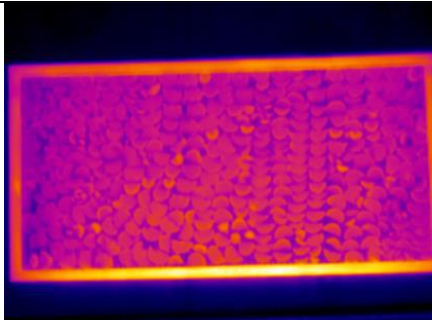
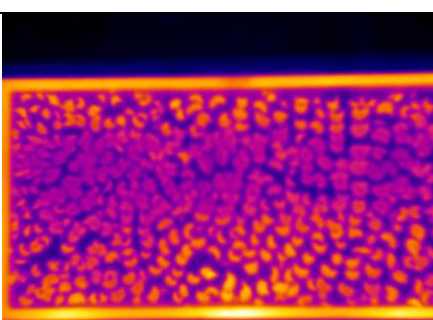
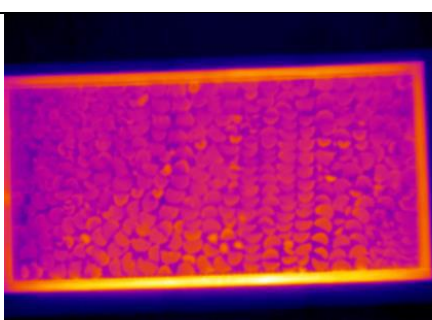
Рис. 3.8. Розміщення лотка зі скибочками яблук при виконанні знімка тепловізором: 1 – сітчастий лоток; 2 – скибочки яблук; 3 – теплоізована поверхня (лист піноплексу завтовшки 50 мм).

У табл. 3.3 представлено зображення термограм, отриманих тепловізором Testo 882.

На представлених термограмах вісь координат X спрямована зверху вниз від лівого верхнього кута лотка. Верхній бік лотка для шафового інфрачервоного пристрою розташований біля дверцят, оснащених центральним відбивачем, верхній бік для пристрою динамічного інфрачервоного сушіння розташований у центрі ярусу пристрою.

Візуальний аналіз термограм показує, що в шафовому пристрої інфрачервоного сушіння спостерігається висока рівномірність нагріву сировини за температур 35 °С і 40 °С. За більш високих температур нерівномірність проявляє себе зростанням температури вздовж довгого боку лотка або впоперек лотка ближче до його країв. У пристрої динамічного інфрачервоного сушіння нерівномірність спостерігається в усьому діапазоні температур уздовж довгого боку лотка: температура на краях лотка нижча, ніж у його центральній частині. Така нерівномірність у пристрої динамічного інфрачервоного сушіння може бути пояснена нерівномірністю розподілу витків спіралі інфрачервоного випромінювача в трубці кварцового скла (під час розтягування спіралі крок витків на її краях більший, ніж крок витків у центральній частині спіралі).

Таблиця 3.3 – Термограми лотків

№	tk, °C	шафвий пристрій інфрачервоного сушіння	пристрій динамічного інфрачервоного сушіння
1	35		
2	40		
3	45		
4	50		

На рис. 3.9 наведені діаграми розподілу температури вздовж короткого боку лотка, тобто вздовж осі координат X, для пристрою динамічного інфрачервоного сушіння. Діаграма 1 демонструє розподіл температури для щойно викладених на лоток скибочок яблук перед сушінням.



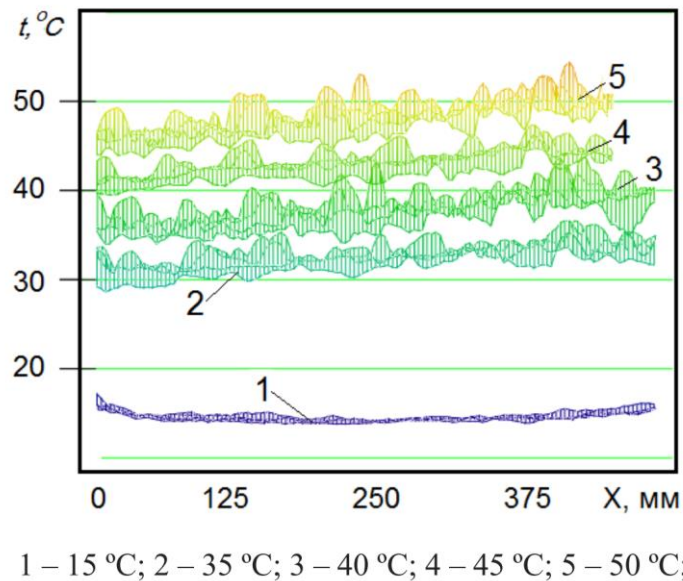


Рис. 3.9. Профілі температури сировини в пристрої динамічного інфрачервоного сушіння

Характерною особливістю діаграм 2, 3, 4 і 5 є практично лінійне збільшення температури до краю лотка, що знаходиться біля завантажувальних дверей пристрою. Такий розподіл узгоджується з даними вимірювання температури з використанням експериментального лотка та даними імітаційних моделей, які демонструють збільшення амплітуди коливань температури за умови зменшення швидкості руху каретки або тривалості теплової дії на сировину інфрачервоних випромінювачів у зонах зміни напрямку руху каретки.

На рис. 3.10 наведено діаграми розподілу температури вздовж короткого боку лотка, тобто вздовж осі координат  $X$ , для шафового пристрою інфрачервоного сушіння.

Діаграми 2 і 3 свідчать про високий ступінь рівномірності розподілу температури сировини в ході нагрівання. При збільшенні температури понад 40 °C нерівномірність нагріву збільшується за рахунок збільшення температури сировини, розміщеної ближче до джерел випромінювання і центрального відбивача, найменші значення температури характерні для серединної частини лотка.

Чисельні значення відхилень температури від середнього значення, що характеризують нерівномірність нагріву сировини на лотку для даних діаграм на рис. 3.9 і 3.10, наведено в табл. 3.4.

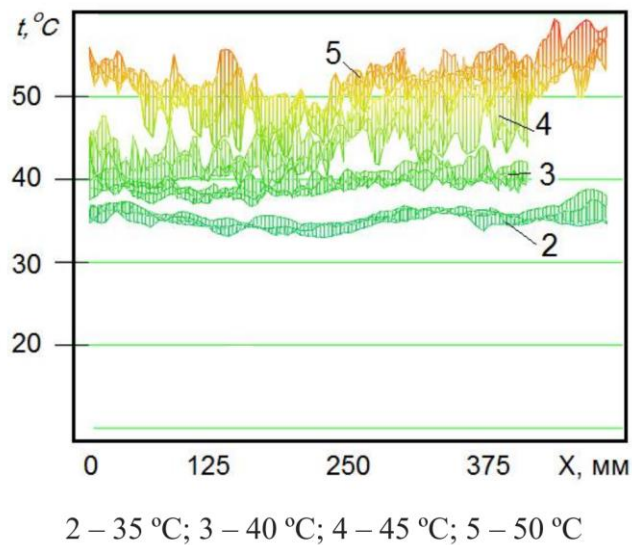


Рис. 3.10. Профілі температури сировини в шафовому пристрої інфрачервоного сушіння

Таблиця 3.4 – Нерівномірність температури сировини під час динамічного інфрачервоного сушіння

№	$t_k, ^\circ\text{C}$	Відхилення температури, $^\circ\text{C}$	
		шафовий пристрій інфрачервоного сушіння	пристрій динамічного інфрачервоного сушіння
1	15	-	$\pm 0,151$
2	35	$\pm 0,389$	$\pm 0,852$
3	40	$\pm 0,788$	$\pm 1,744$
4	45	$\pm 3,191$	$\pm 1,069$
5	50	$\pm 3,631$	$\pm 1,949$

Граничні відхилення наведено для довірчої ймовірності  $R_{\text{дов}} = 0,95$ .

Відповідно до даних таблиці 3.4 нерівномірність розподілу температури протягом періоду релейного регулювання температури, характерного для рівнів температури 45  $^\circ\text{C}$  і вище, у пристрої динамічного інфрачервоного сушіння в 1,8 – 2,6 рази нижча, ніж у шафовому пристрої інфрачервоного сушіння.

### 3.3 Експериментальне дослідження ступеня збереження біологічно активних речовин під час динамічного інфрачервоного сушіння в компактному багатоярусному пристрої

Метою експериментального дослідження ступеня збереження біологічно активних речовин під час динамічного інфрачервоного сушіння в компактному багатоярусному пристрої є визначення впливу режимів і способу сушіння солодкого виноградного вижимки на вміст у ній фенольних речовин.

Завданнями дослідження є:

- підбір методик визначення масової концентрації фенольних речовин у солодкій виноградній вижимці;
- визначення впливу режимів і способу сушіння на масові концентрації фенольних речовин;
- визначення впливу режимів і способу сушіння на масові концентрації фарбувальних речовин.

Масові концентрації фенолокислот, флован-3-олів визначали методом ВЕРХ.

Методику здійснено на хроматографі фірми Agilent Technologies (модель 1100), укомплектованому проточним вакуумним дегазатором G1379A, 4-х каналним насосом градієнта низького тиску G13111A, автоматичним інжектором G1313A, термостатом колонок G13116A, діодноматричним детектором G1316A. Для проведення аналізу використано хроматографічну колонку розміром 2,1×150 мм, заповнену октадецилсилільним сорбентом, зернистістю 3,5 мкм, «ZORBAX-SB C-18».

Умови хроматографування.

Для проведення аналізу встановлювали такий режим хроматографування:

швидкість подачі рухомої фази – 0,25 мл/хв;

робочий тиск елюента – 110 - 260 кПа;

температура термостата колонки – 45 °С;

об'єм проби – 2 мкл;

Параметри детектування встановлювали такі:

масштаб вимірів – 1,0;

час сканування – 0,5 с;

параметри зняття спектра – кожен пік 190-600 нм.

Ідентифікацію фенольних здійснювали за часами утримування стандартів і спектральними характеристиками.

Масову концентрацію компонентів фенольного комплексу вимірювали колориметричним методом з використанням реактиву Фоліна-Чокальтеу.

Вивчали вплив температури та способу сушіння солодкої червоної виноградної вижимки сорту Каберне-Совіньйон на масові концентрації фенолокислот: галлову, протокатехову, бузкову, кафтарову та кутарову.

Підвищення температури сушіння з 40 °С до 60 °С призводить до збільшення вмісту кафтарової кислоти (рис. 3.21). Це пов'язано з тим, що в солодкій виноградній вижимці відбуваються окислювально-відновлювальні ферментативні процеси. У випадку кафтарової кислоти це передусім пов'язано з активністю монофенол-монооксигенази, субстратами окислення якої є оксикоричні кислоти. Збільшення температури сушіння призводить до інтенсивнішого видалення вологи з матеріалу, що своєю чергою сприяє зниженню контакту фермент-субстрат.

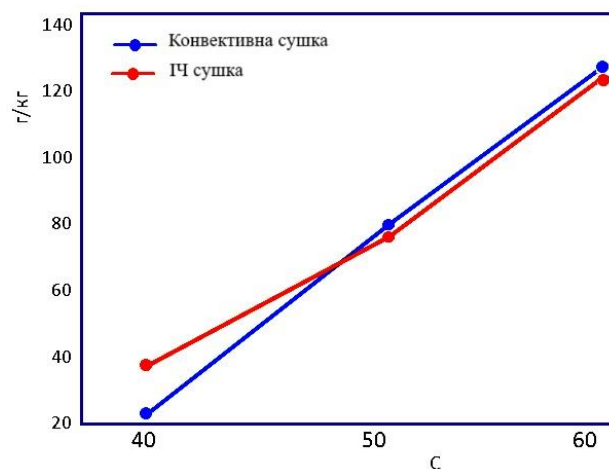


Рис. 3.11. Вплив способу та температури сушіння на масову концентрацію кафтарової кислоти в солодкій виноградній вижимці.

Процеси, аналогічні збільшенню масової концентрації кафтарової кислоти, визначено під час вивчення впливу способу й температури сушіння на масову концентрацію кутарової кислоти. Отримані результати представлено на рис. 3.12.

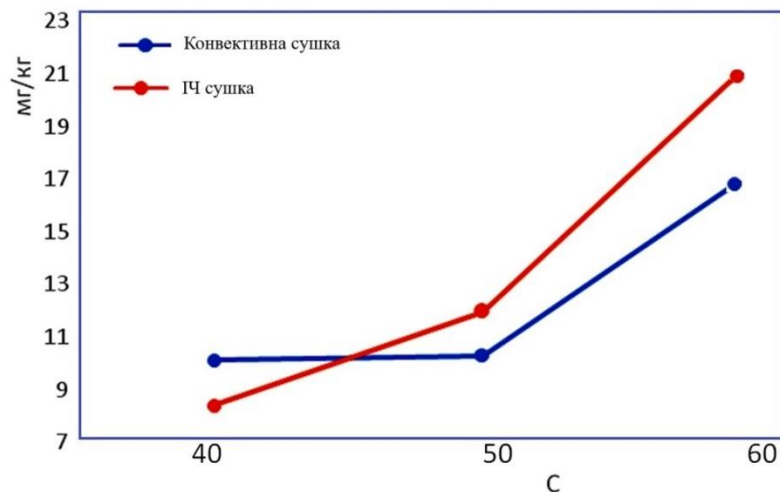


Рис. 3.12. Вплив способу і температури сушіння на масову концентрацію кутарової кислоти в солодкій виноградній вижимці.

Загалом, найбільшу масову концентрацію фенольних речовин визначено у зразку солодкої виноградної вижимки, висушеної за температури 50°C інфрачервоним способом (рис. 3.13).

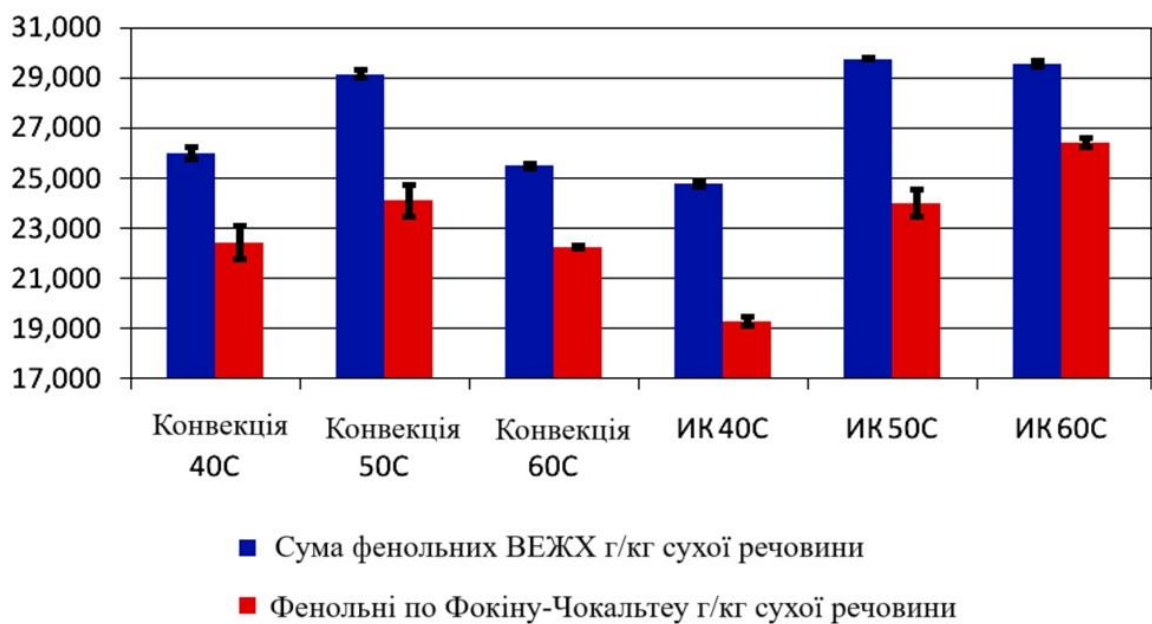


Рис. 3.13. Вплив способу та температури сушіння на масову концентрацію фенольних речовин у солодкій виноградній вижимці

У цьому зразку визначено найбільшу концентрацію полімерних фенольних сполук 26,3 г/кг (у зразку, висушеному за температури 50 °С конвективним сушінням 23,9 г/кг).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено конструкцію та виготовлено експериментальний компактний багатоярусний пристрій динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини з високим вмістом біологічно активних речовин.

Експериментально визначено порівняльні характеристики процесу сушіння виноградної вижимки в розробленому компактному пристрої динамічного інфрачервоного сушіння та компактному пристрої конвективного сушіння. Ефективними режимами сушіння є гранично великі за допустимим для збереження біологічно активних речовин температури сировини під час сушіння. Зниження температури сировини під час сушіння з 60 °С до 50 °С призводить до збільшення питомих енергетичних витрат більш ніж на 10 %, а тривалість сушіння збільшується в 1,7 рази.

Динамічна інфрачервона сушка в розробленому компактному пристрої ефективніше за конвективну сушку в компактному пристрої за витратами в 1,2 рази, а за тривалістю сушіння в 1,3 рази.

Конструкція пристрою динамічної інфрачервоної сушки має резерви збільшення рівномірності розподілу температури сировини в ході сушіння за рахунок підвищення рівномірності розподілу нагрівальної спіралі інфрачервоного випромінювача в кварцовій трубці і збільшення швидкості руху каретки з інфрачервоними випромінювачами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герасимчук А.А. Кормова цінність продуктів переробки сої та бобових трав. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 431-434.
2. Дерев'янюк Д.А., Герасимчук А.А., Романюк В.А. Експериментальна камера динамічного інфрачервоного сушіння рослинної сировини. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві». (01-18 жовтня 2024 р.). <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (дата звернення 01.12.2024).
3. Дерев'янюк Д.А., Герасимчук А.А. Способи та компактні пристрої інфрачервоного сушіння рослинної сировини. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «ЕКАР – пріоритетні напрями розвитку агропромислового виробництва України в умовах Євроінтеграції»,(22-23 жовтня 2024 року), ІМА АПВ НААН України, Глеваха. 2024. С.
4. Бойко В. І., Сидоренко Г. М. Технологічні режими сушіння сільськогосподарської продукції. Київ: Агроосвіта, 2018. 285 с.
5. Василенко А. П., Журба М. С. Інфрачервоні сушильні установки для аграрного виробництва. Харків: Техносфера, 2020. 270 с.
6. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
7. Грищенко П. М., Савчук Л. В. Тепломасообмін у процесах сушіння. Львів: Афіша, 2019. 240 с.



8. Дяченко І. М., Коваленко О. С. Ефективні методи сушіння сільськогосподарської сировини. Вінниця: Універсум, 2021. 312 с.
9. Захарченко П. О., Корнієнко В. І. Обґрунтування параметрів інфрачервоного сушіння. Тернопіль: Економічна думка, 2019. 265 с.
10. Іванченко Л. П., Смирнов О. Г. Інфрачервоне сушіння зернових і кормових культур. Одеса: Наука і техніка, 2020. 254 с.
11. Коломієць І. В., Петренко А. В. Технології сушіння в агропромисловому комплексі. Житомир: Полісся, 2018. 278 с.
12. Ляшенко П. А., Радченко І. Ю. Режими інфрачервоного сушіння рослинної сировини. Київ: Аграрна освіта, 2021. 312 с.
13. Носаченко О. П. Теплові режими інфрачервоного сушіння. Харків: ІНЖЕК, 2019. 296 с.
14. Паламарчук В. О., Руденко С. П. Сушіння сільськогосподарської продукції: теорія і практика. Львів: Світ, 2020. 288 с.
15. Adams J. E., Bennett R. H. Infrared Drying of Agricultural Materials: Theory and Applications. New York: Springer, 2020. 312 p.
16. Brown R., Smith K. Infrared Technology for Drying High-Moisture Agricultural Products. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. 278 p.
17. Chen T., Li X. Heat and Mass Transfer in Infrared Drying. Amsterdam: Elsevier, 2021. 290 p.
18. Davis M., Johnson R. Optimization of Infrared Drying Parameters for Agricultural Use. London: Academic Press, 2019. 302 p.
19. Gupta R. K., Singh P. Advances in Infrared Drying of Biomass and Food Materials. Amsterdam: Elsevier, 2020. 265 p.
20. Kim Y., Lee H. Infrared Heating Systems in Agricultural Processing. Tokyo: Springer Japan, 2021. 312 p.
21. Martinez J. M., Silva L. R. Infrared Drying Technologies for Sustainable Agriculture. London: Wiley-Blackwell, 2020. 298 p.

22. Peterson L., Evans R. Heat Transfer and Infrared Drying of Moist Biomaterials. Berlin: Springer, 2019. 280 p.
23. Richardson A., Green S. Principles of Infrared Drying for High-Moisture Products. New York: Routledge, 2020. 256 p.
24. Wilson T., Brown A. Infrared Radiation Techniques for Agricultural Drying. Oxford: Wiley, 2021. 310 p.