

ПОЛТАВСЬКА ДЕРЖАВНА АГРАРНА АКАДЕМІЯ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра технологій та обладнання переробних і харчових виробництв

Пояснювальна записка
до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти
«магістр»
бакалавр, магістр

на тему: «Поліпшення параметрів сушіння рослинної сировини при променистому теплопідводі»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Технології і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП
спеціальності 208 Агроінженерія
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр» групи ____
Бурсова М. А.
Прізвище та ініціали студента
Керівник: ІВАНОВ О. М.
Прізвище та ініціали керівника
Рецензент: ІВАНКОВА О. В.
Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2021 року

ВСТУП

Актуальність. Довге зберігання коренеплодів в сирому вигляді потребує більших енерговитрат на підтримання раціональної вологості, температурного стану, кількісного газового складу у сховищі та інших параметрів. Навіть при підтриманні оптимальних параметрів зберігання певна частка врожаю зменшує свою товарну придатність, а інша - втрачає свої біологічно активні речовини за рахунок природних процесів життєдіяльності, що відбуваються в коренеплодах.

Способів для зберігання коренеплодів досить багато. Значний вміст води і вуглеводів в окреслених продуктах утруднює процес їхнього довготривалого зберігання. Коренеплоди дихають при зберіганні, в них не припиняються ферментативні процеси. При підвищенні температури і вологості повітря, посилюється інтенсивність дихання, збільшуються втрати органічних речовин і вітамінів. Оптимальною температурою зберігання коренеплодів є 0°C.

Незначне підвищення температури відображається на посиленні дихання та випаровування води, що відображається на проростанні і псуванні коренеплодів, виникненню пліснявих грибів, розмноженню гнильних бактерій. Незначне збільшення температури в овочесховищі, навіть на півградуса, спричинить утворення вологи на поверхні коренеплодів і загнивання. Одним з перспективних способів тривалого зберігання коренеплодів з максимальним вмістом вітамінів і мікроелементів є сушка.

Коренеплоди зневодненні при застосування новітніх підходів та устаткування зберігають до 96% корисних мікроелементів та вітамінів і можуть бути віднесені до продуктів за значною біологічною активністю.

Аналіз розвитку електротехнологій, що застосовуються для сушіння сільськогосподарської сировини, показує, що поширене використання зазнали установки, що працюють на основі застосування принципу перетворення енергії електричного струму в інфрачервоне випромінювання.

Технологія використання сушки при промислому теплопідводі до вологих продуктів сприяє майже 100% використанню підведеної до коренеплодів енергії. На

відміну від всіх інших видів сушіння, енергія підводиться безпосередньо до води продукту, чим досягається висока ККД процесу сушіння.

Тому дослідження, направлені на поліпшення умов зневоднення продуктів з використанням промінистого способу підводу теплової енергії є безумовно актуальними та мають суттєве практичне застосування.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка енергозберігаючої технології імпульсної інфрачервоної сушки, що дозволяла би зберігати високу біологічну активність коренеплодів.

У відповідності до мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- навести аналітичний огляд технологій та технічного устаткування, що застосовується для сушки сільськогосподарської продукції та окреслення основних вимоги для даного процесу;
- розробити алгоритми і методичку проведення експериментальних досліджень процесу інфрачервоного сушки коренеплодів для пошуку раціональних режимів керування ІЧ-енергопідводом;
- провести дослідження по визначенню оптимальних режимів і технологічних параметрів інфрачервоної сушки;
- провести техніко-економічний аналіз устаткування інфрачервоної сушки коренеплодів.
- привести екологічне обґрунтування доцільності використання інфрачервоного сушки сільськогосподарських культур та відобразити основні підходи до формування безпечних умов експлуатації теплотехнічного обладнання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння зерна сільськогосподарських культур за допомогою промінистого способу теплообміну.

Предмет дослідження – кількісні показники продуктів при варіюванні технологічними режимами імпульсної інфрачервоної сушки.

Методика досліджень. Рішення поставлених завдань базується на відомих теоретичних положеннях і експериментальних даних технології сушки харчових продуктів, біофізики, термодинаміки незворотних процесів, тепломасообміну, автоматичного управління, математичної статистики.

Ефективні режими ІЧ-сушіння коренеплодів визначені за допомогою теоретичних і експериментальних досліджень.

Обробка результатів досліджень проводилася за допомогою ПК та використанням програмних продуктів: табличного процесора Microsoft Excel, математичного редактора STATISTICS, програмного забезпечення Autocad та MATLAB.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Алгоритми і методики експериментальних досліджень електротехнологічних параметрів імпульсної інфрачервоної сушки коренеплодів, що дозволяють встановити ефективні режими управління ІЧ-енергопідводом.

2. Електрофізичні характеристики коренеплодів, що визначають технологічні параметри інфрачервоної сушки різними ІЧ-випромінювачами.

3. Алгоритм вибору технічних і конструкційних параметрів сушильної установки з використанням імпульсних керамічних випромінювачей.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

1. Результатах експериментальних досліджень, що дозволяють враховувати електротехнічні особливості ІЧ-випромінювачей при сушінні сільськогосподарської продукції з меншими енергозатратами.

2. Графоаналітичні результати досліджень, що підтверджують ефективність застосування ІЧ-сушіння.

3. Сукупність контрольно-вимірювального обладнання для проведення лабораторних досліджень.

1 СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Практика використання технології сушки сільськогосподарської продукції

Існує велика різноманітність способів, методів і засобів сушіння рослинної сировини, що обумовлено особливостями матеріалів, що піддаються сушці, видами зв'язку вологи з матеріалом, метою сушіння, економічними міркуваннями.

Установки для сушіння рослинної сировини класифікують по ряду ознак [35]:

- за методом, що застосовується для сушіння рослинної сировини (конвекторні, кондуктивні, інфрачервоні, струмами високої і надвисокої частоти);
- по тиску, що виникає всередині сушильної камери (атмосферні, вакуумні, сублімаційні);
- за способом руху сушильного агенту (з природною і штучною циркуляцією);
- за типом роботи обладнання (періодичного і безперервного дії);
- за характером руху сушильного агенту (прямоточні, протиточні, зустрічне);
- за конструктивними ознаками (камерні, шахтні, коридорні, барабанні);
- за способом нагріву сушильного агенту (парові, вогневі, електричні);
- за видом об'єкту сушіння (тверді, рідкі, пастоподібні);
- за видом сушильного агенту.

При виборі технологічного обладнання для сушіння певного матеріалу, в першу чергу, необхідно звернути увагу на метод, що реалізується в цьому пристрої. Метод термообробки сировини повинен відповідати наступним вимогам: найменші витрати енергії, зниження втрат активно діючих речовин повинно бути мінімальним, кінцевий продукт повинен характеризуватися високими харчовими і смаковими властивостями, добре відновлюватися, зберігатися тривалий час, зберігати найбільш цінні компоненти і поживні речовини.

Однак, реалізувати всі ці вимоги на основі традиційних методів обробки надзвичайно важко. Одним з найбільш ефективних і можливих підходів є застосування енергозберігаючих електротехнологій. Розвиток цього напрямку

обумовлюється тим, що речовина має електричну природу. Відомо, що найбільш ефективно на електричні заряджені частинки впливають за допомогою електричних, магнітних і електромагнітних полів.

Рослинна сировина за своєю фізичною природою характеризується визначеними електрофізичними властивостями: теплоємністю, теплопровідністю, електропровідністю, діелектричної і магнітної проникністю, оптичними властивостями. Дані властивості відображаються при впливі на матеріал електричним, магнітним і електромагнітним полями, хвилями різної частоти. В результаті впливу вищеназваними факторами відбуваються зміни в стані електричних зарядів даних матеріалів, що призводить до виділення теплоти в речовині і, одночасно, до зміни хімічних і фізичних властивостей [8].

Електротехнології принципово відрізняються своєю різноманітністю методів впливу на сировину, при цьому електрика може бути використано для безпосереднього технологічного впливу на оброблюваний продукт. Можливість застосування електричної енергії в різних її формах дозволила створити принципово нові електрофізичні підходи для обробки харчових продуктів.

Найпростіший і старий метод сушіння - природна сушка. Існуючі методи, способи і засоби для природного видалення вологи з рослинної сировини за енерговитратами досить незначні. Даний метод є традиційним і в даний час застосовується для сушіння в різних галузях сільського господарства. Основною сировиною в сільському господарстві, висушують природними методами, безумовно, є сіно, різні види трав, скошені і приготовані на корм худобі в зимовий час. Перевага даного методу полягає в тому, що він не вимагає капітальних вкладень, використовується лише енергія сонячних променів. Недолік - метод залежить від погодних умов і пов'язаний з великими втратами поживних речовин. На противагу природній сушці, штучну сушку проводять в сушильних установках, які зазвичай встановлюють в закритих приміщеннях і постачають необхідними джерелами енергії. Найбільш широко в сільському господарстві використовується обладнання, засноване на конвективних механізмах зневоднення. Однак, такий спосіб не

забезпечує високої якості отримуваної продукції і характеризується значною енергоємністю.

Конвективна сушка - технологічний процес тепло- і вологообміну між зневодненим матеріалом і агентом сушіння, що супроводжується біохімічними і структурно-механічними змінами речовин, що входять у матеріал [22]. Оптимальна температура агента сушіння при зневодненні вологих харчових матеріалів конвективним способом знаходиться в наступних межах: картоплі в залежності від сорту 110-150°C; моркви та столового буряку 109-159°C. Конвективна сушка здійснюється, в основному, на конвеєрних сушарках, на транспортерному полотні яких рівним шаром розташовується вимита і подрібнена сировина. Сушильним агентом є нагрітий газ (повітря, продукти згоряння палива, газоповітряна суміш, перегрітий пар, інертний газ - азот), який одночасно є тепловіддавачем і вологопоглиначем, що обумовлює порівняльну простоту конструкції конвективних сушарок. Перенесення вологи всередині матеріалу відбувається за рахунок неізотермічної масопроводності (влагопровідності і термовлагопровідності) як у вигляді рідини, так і вигляді пари [8].

Однак, у міру висихання і зменшення теплопровідності матеріалу велика частка енергії не проникає вглиб матеріалу, а передається оточуючому середовищу. Енергоємність процесу і час сушки значно зростає, продукт перегрівається, що позначається на якості готової продукції. Збільшення часу і температури процесу сушіння викликає втрату харчової цінності, загибель вітамінів, зниження вмісту корисних речовин, погіршення органолептичних характеристик. Особливо ці фактори проявляються при сушінні сировини невисокої вологості. Отримані таким чином продукти непридатні для дитячого, дієтичного або функціонального харчування. До відносних переваг даного методу відноситься можливість переробки великих обсягів сировини [7].

У ліофільних сушарках значна кількість вологи (74-82%) видалається при сублімації льоду за температури нижче 0°C, і лише видалення залишкової вологи здійснюється при нагріванні матеріалу до 45-65°C [17, 31]. Продукти сублімаційного сушіння відрізняються відмінними якостями, зберігають поживні речовини, мають

підвищену відновлювальну здатність, мають значну усадку, зберігають колір і мають пористу будову. З точки зору збереження якості, сушка сублімацією є найбільш досконалою з усіх способів сушки [20]. Однак, сублімаційні сушарки мають дуже складне і вартісне обладнання, складні в експлуатації, і мають значну витрату електроенергії. Крім того, при сублімаційному сушінні відсутній контакт матеріалу з киснем повітря і висушений продукт має низький вміст води, пористу структуру, що робить його дуже чутливим до вологи і кисню.

Теплопровідність – це молекулярний перенос теплоти в суцільному середовищі, обумовлений наявністю градієнта температури [8]. Кондуктивний метод заснований на передачі теплової енергії від матеріалу до гарячої поверхні при безпосередньому дотику між ними. Повітря у даному випадку служить тільки для видалення водяної пари з сушарки, виступаючи в якості вологопоглинача. Коефіцієнт тепловіддачі при кондуктивному способі значно вищий, ніж при конвективній сушки, і становить 160-170 Вт / (м²·град) [7,8]. У харчовій промисловості кондуктивна сушка застосовується головним чином в консервному і овочесушильному виробництві: в процесах випічки, обсмаження, при обробці продуктів в киплячому шарі і віброкиплячому шарі. Сушка вимагає великих капітальних витрат, потужного парового господарства, що прив'язує її до індустріальних центрів, а, отже, відрізняється великими транспортними затратами.

Перспективним є використання сушки в електромагнітному полі високої (ВЧ) і надвисокої частоти (СВЧ), зважаючи на низку важливих відмінностей від класичних способів нагріву. До основних особливостей поля СВЧ слід віднести: здібність проникати на суттєву глибину всередину матеріалу, незалежність тривалості прогріву до заданої температури від об'єму і форми виробів, відсутність контакту виробу з теплоносієм, високий ККД перетворення енергії в тепло, що виділяється в нагрітому об'єкті. Випаровування вологи відбувається в усьому об'єму тіла, і всередині нього виникає градієнт загального тиску, інтенсифікується загальний перенос вологи. Змінюючи напруженість поля, можна плавно регулювати температуру матеріалу при сушінні.

Інфрачервоний метод сушіння по багатьом показникам можна порівняти з іншими методами, а за енерговитратами на випаровування вологи навіть перевершує інші методи сушіння. Даний метод не вимагає теплоносія, часто сприяє забрудненню оброблюваного продукту і часткового його видалення. Завдяки високій проникаючій здатності ІЧ-випромінювання в матеріал тепловиділення відбувається в глибині матеріалу, при цьому інтенсивність сушки збільшується в 1,5-2 рази, що призводить до зниження енерговитрат.

При поглинанні тілами інфрачервоних променів в них збільшується інтенсивність теплового руху атомів і молекул, що викликає їх нагрів. Специфічний вплив ІЧ-випромінювання на продукти рослинного походження зв'язано з інтенсифікацією процесів біохімічних перетворень, що обумовлено резонансним впливом поглинутої енергії на зв'язок атомів в молекулах, частота коливань яких є рівними або кратними частотам випромінювання.

При сушінні інфрачервоними променями в матеріалі виникають перепади температур, під дією яких волога переміщується у напрямку теплового потоку всередину матеріалу. Крім того, волога частково випаровується з поверхні, в результаті чого відбувається зростання градієнту вологоутримання ΔU , величина якого стає більше ΔT , і волога починає переміщатися до зовнішньої поверхні. Таким чином, градієнт температури ΔT надає гальмуючий вплив на переміщення вологи. Отже, для матеріалів, у яких розмір часток більше глибини проникнення інфрачервоних променів, рекомендується переривчасте опромінення.

Переваги ІЧ-нагріву перед іншими методами нагріву [10]:

– при променистому нагріванні кількість переданого тепла, яке визначається за законом Стефана-Больцмана, пропорційно різниці четвертої степені температур випромінювача і тіла, що нагрівається. Якщо порівняти теплопередачу методом конвекції і ІЧ-променями, то при температурі випромінювача в 1500°C інфрачервоне випромінювання виявляється в 4-5 разів інтенсивніше теплопередачі конвекцією. Отже, перевага інфрачервоного нагріву перед конвективним полягає, перш за все, в більшій інтенсивності теплопередачі, однак, потрібно, щоб температура випромінювача була вище 500°C ;

– можливість спрямованого фокусування променистого потоку на нагрітий об'єкт за допомогою відбивачів, при цьому нагрів або випромінювання в інші сторони легко зводиться до мінімуму. Температура повітря, через яке проходять промені, для процесу нагрівання або сушіння не має суттєвого значення;

– можливість селективного нагріву.

Слід зауважити, що сушка плодів, овочів і фруктів за допомогою енергії інфрачервоного випромінювання є дуже проблематичною. Плоди, овочі і фрукти як об'єкти сушіння характеризуються великим вмістом води і порівняно малим вмістом сухих речовин. Основна частина води знаходиться в більш-менш вільній рухомій формі і тільки близько 5% її пов'язано в клітинних колоїдах і міцно утримується. Даний фактор обумовлює поглинання енергії інфрачервоного випромінювання в поверхневих шарах оброблюваного матеріалу і ускладнює тим самим видалення вологи з внутрішніх шарів. Вихід з такого становища можливий в комбінаціях ІЧ-енергопідводу з іншими способами тепло- і масообміну або при перервному опроміненні вологого матеріалу, до яких і належать коренеплодів. Сушка комбінованими режимами плодів, овочів і фруктів за допомогою енергії інфрачервоного випромінювання підтверджується табличними даними (табл. 1.1) [19].

Таблиця 1.1 – Параметри інфрачервоної сушки продуктів

Найменування продукту	Товщина шару, мм	Маса продукту на одиницю поверхні конвеєру, кг/м ²	Тривалість сушки, год	Витрата електроенергії, кВт·год/кг
Фасоль	10	11	2,4	0,76
Морква	6	11	4	1,09
Репа	7	11	3	0,74
Капуста	11	8	1,4	0,75
Томати	–	3,3	2,3	1,83
Гарбуз	9	5	3,3	2,1
Баклажани	8	7	5	1,67
Картопля	6	11	3	1
Чорнослив	–	16	4	0,71
Абрикоси	–	16	3,4	0,83
Персики	–	16	5	0,86
Груша	9	13	4,3	1,34

Аналіз таблиці свідчить про те, що тривалість сушіння більшості плодів, овочів і фруктів обчислюється кількома годинами. Враховуючи, що гранично допустима температура нагріву більшості продуктів не повинна перевищувати 60°C, можна легко встановити режим сушки. Сушка плодів, овочів і фруктів повинна здійснюватися в м'яких температурних режимах. Отже, швидкість нагріву цих матеріалів не повинна перевищувати навіть 1°C/с.

Аналіз сучасного стану застосування ІЧ-енергопідводу в технології переробки сировини рослинного походження показав, що в даний час не розглядалися питання отримання продукту з оптимальним складом активно діючих речовин в технології переробки коренеплодів з використанням імпульсних керамічних перетворювачів випромінювання. Недоліком деяких робіт є відсутність систем раціонального управління Іс-енергопідводом. У зв'язку з цим, поставлена задача отримання продукту значної біологічної активності, рішення якої включає в себе вибір ефективних режимів ІЧ-енергопідводу в технології сушіння цукровмісних коренеплодів.

1.2 Характеристики та властивості коренеплодів

У процесі сушіння коренеплодів їх структурно-хімічні, фізико-механічні та біологічні властивості змінюються, тому завдання сушки полягає в тому, щоб, крім швидкості процесу і найкращих теплотехнічних показників, домогтися гарних показників якості висушеного продукту. Інтенсивність вологопереносу в процесі сушіння залежить від механізму перенесення вологи, структури пористого простору матеріалу і зовнішніх температурно-вологісних і гідродинамічних умов, в яких протікає процес сушіння. Механізм переносу вологи визначається характерним розміром пор, за якими відбувається перенос вологи. Отже, при виборі ефективного режиму необхідно враховувати основні властивості коренеплодів. Не можна абстрактно від конкретного матеріалу і його характерних властивостей говорити про кращий метод його сушіння. Те, що добре для одного матеріалу, часто непридатне для іншого, тому важливо знати ті властивості сировини, які мають значення для підбору

режиму сушіння. До таких основних властивостей відносяться вологість, теплофізичні, оптичні, механічні, хімічні, а також розміри сировини або його часток.

Від вологості матеріалу і енергії її зв'язку з матеріалом залежать режим сушки, продуктивність і економічність процесу.

Рівноважна вологість визначає здатність матеріалу утримувати вологу і грає велику роль в теорії та практиці сушіння. За значеннями рівноважної вологості визначають зв'язок вологи з матеріалом, потенційну можливість повітря як сушильного агента, умови зберігання висушених продуктів, вид тари для упаковки. Особливо велике значення рівноважна вологість набуває при сушінні коренеплодів, так як розрив між сушінням і споживанням даних продуктів може досягати від місяця до року, а межі зміни температури від $+30^{\circ}\text{C}$ до -40°C і вологості від 10 до 100%. Якщо відомо, що продукт за даних умов зберігання досягає певної рівноважної вологості, то немає сенсу висушувати його до меншої вологості. І навпаки, якщо відомо, що даний продукт при певній вологості під час зберігання має великі втрати поживних речовин або навіть псується, то дана вологість є критеріальною при підборі режимів сушки і умов зберігання [5]. Велике значення при виборі методу сушки мають розміри сировини або його часток. При інфрачервоній сушці глибина проникнення випромінювання в сировині надає вирішальне значення на температуру сировини, швидкість сушіння і загальну тривалість процесу.

При такому методі важливим є стан поверхні сировини. Наприклад, пориста і темна поверхня буряку інтенсивніше поглинає випромінювання і швидше нагрівається, а пориста світла поверхня топінамбура частково відбиває ІЧ-випромінювання і повільніше прогрівається, тим самим на процес сушіння витрачається більше часу, що призводить до втрат поживних речовин.

Теплофізичні характеристики коренеплодів. Для аналізу і розрахунку процесу сушіння необхідно знати теплофізичні характеристики коренеплодів, такі як коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності, теплоємність сировини. Теплофізичні характеристики впливають на швидкість протікання тепло- і масообміну [8].

Фізичні та теплофізичні властивості та характеристики коренеплодів наведені в таблицях 1.2, 1.3.

Таблиці 1.2 – Фізичні показники коренеплодів [8]

Коренеплод	w	ρ_n , кг/м ³
Морква	0,91	625
Буряк	0,74-0,81	555
Топінамбур	0,8-0,81	515

Таблиці 1.3 – Фізичні показники коренеплодів [8]

Коренеплод	c_v , кДж/(м ³ ·К)	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-8}$, м ² /с
Морква	3140-4000	0,57	13,6
Буряк	3440-3530	0,49	13,1
Топінамбур	3930	0,41	11,4

Значення теплофізичних характеристик для різних сортів коренеплодів помітно відрізняються. Це викликано неоднаковою пористістю і масовою часткою вологи в коренеплодах, а також тим, що зразки, призначені для переробки, беруться з різних частин коренеплодів.

Експериментально встановлено, що фізична щільність серцевини більше, ніж поверхневих шарів коренеплодів [23]. З цієї причини теплопровідність серцевини більше, ніж поверхневих шарів. Значення теплофізичних характеристик, отримані різними експериментальними методами, мають деякі відмінності. Так, для моркви визначення за методом імпульсного джерела величини коефіцієнта теплопровідності і температуропровідності, відповідно 0,62 Вт/(м·град) і $0,15 \cdot 10^{-6}$ м²/сек, а за методом бікалориметра двох точок 0,61 Вт/(м·град) і $0,164 \cdot 10^{-6}$ м²/сек [8].

На величину теплофізичних характеристик впливає походження і природа речовини. Розміри і розташування квазічастинок на молекулярному рівні мають різний характер навіть для одного сорту матеріалу, виробленого в різних умовах [8].

За узагальненими даними, наведеними професором Г.К. Філоненко [37]:

- моркві відповідають наступні значення теплофізичних характеристик: питома теплоємність 3,13-3,8 кДж/(кг·град); коефіцієнт теплопровідності 0,17-0,638 Вт/(м·град); коефіцієнт температуропровідності $0,113-0,269 \cdot 10^{-6}$ м²/сек;

- буряку відповідають наступні значення теплофізичних характеристик: питома теплоємність 3,34-3,8 кДж/(кг·град); коефіцієнт теплопровідності 0,25-0,638 Вт/(м·град); коефіцієнт температуропровідності $a \cdot 10^2 = 0,077-0,169$ м²/сек.

Наведені значення коефіцієнтів теплопровідності і температуропровідності свідчать про те, що в процесі сушіння коренеплодів швидкість поширення теплоти в об'ємі продукту невелика. Отже, сушка великих частинок призводить до того, що зовнішні шари продукту мають більш високу температуру, ніж внутрішні. У такому випадку реалізація процесу при високій температурі може призвести до нерівномірного висушування, а також до підгоряння зовнішніх шарів продукту.

Гігроскопічні і вологопереносні властивості коренеплодів. Властивості матеріалів залежать від вмісту в них вологи і форми її зв'язку з речовиною, а також умов випаровування вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище, тому видалення вологи з матеріалу при сушінні різних за властивостями продуктів проходить по-різному.

За класифікацією вологих дисперсних харчових продуктів, запропонованою професором А.Ф. Буляндрую, овочі мають [8]:

- малу пористість до 50% вологості, велику - понад 50% вологості;
- характер взаємодії частинок дисперсної фази – сильноструктуровані;
- кількість компонентів і їх агрегатний стан - тверде + рідке + газоподібне;
- взаємодія вологи з матеріалом - поверхневооб'ємне;
- структурні зміни при взаємодії з вологою - набухають, а при сушінні дають усадку.

За основу класифікації форм зв'язку вологи з матеріалом в даний час прийнята схема, запропонована академіком П.А. Ребиндером [33], відповідно до якої форми зв'язку визначаються енергією, що витрачається на порушення зв'язку води зі скелетом твердого тіла при сушінні.

З метою отримання відомостей про характер зв'язку вологи з матеріалом, про потенційну можливість повітря як сушильного агенту для даного продукту, а також про умови зберігання висушених продуктів визначають значення рівноважного вологовмісту продукту в залежності від відносної вологості і температури повітря. Рівноважний вологовміст продукту можна визначити експериментально, воно залежить також від способу досягнення рівноваги. Результати цих експериментів представляють у вигляді ізотерм сорбції та десорбції. Ізотерми сорбції для моркви були отримані професором Г.К Філоненко (рис. 1.1) [38].

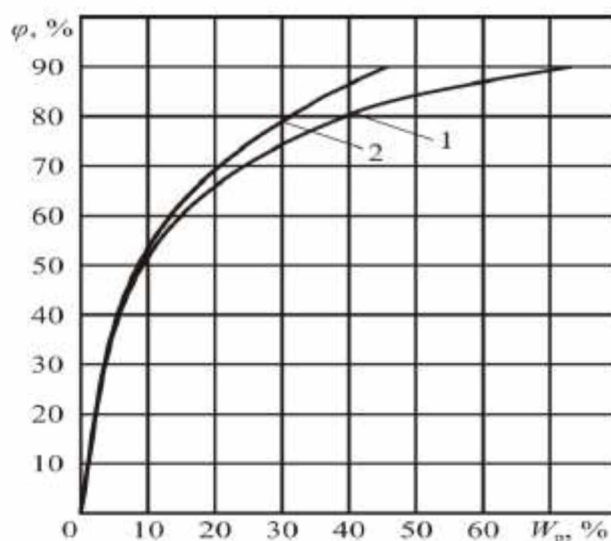


Рисунок 1.1 – Ізотерми сорбції моркви: 1 – $t=25^{\circ}\text{C}$; 2 – $t=60^{\circ}\text{C}$.

У таблиці 1.4 представлені експериментальні дані, отримані Л.Н. Нікітіної [28].

Таблиця 1.4 - Залежність рівноважної вологості коренеплодів від параметрів повітря

T, K	Относительная влажность воздуха $\nu, \%$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Морква										
293	3,1	3,8	6,1	8,2	14,2	17,6	22,7	30,4	47,1	–
298	1,3	2,6	4,4	7,1	10,3	15,3	23,2	28,1	76,2	–
333	1,3	2,7	4,2	6,7	9,4	13,7	19,6	23,4	48,3	–
353	1,5	3,1	5,1	7,5	10,2	14,1	18,6	25,1	33,7	47,1
Бурак										
293	6,4	7,9	10,2	11,1	11,2	15,5	19,6	28,6	60,1	–

Аналіз даних таблиці 1.4 показує, що в складських приміщеннях, де параметри зберігання не відповідають оптимальним значенням, визначеним з ізотерм десорбції, продукти зволожуються і псуються.

Втрата вологи живої рослинної тканиною - незворотний процес, тому теорія сорбційних процесів не завжди може бути застосована до живої рослинної тканини з неуразеним епідермісом [26]. Однак, характер ізотерм типовий для колоїдних капілярно-пористих тіл.

Результати досліджень сорбційних характеристик дозволяє визначити гранично допустимі терміни зберігання продуктів.

В роботі [37] визначено три періоди дегідратації води і перетворення сухих речовин при термічному впливі на топінамбур, а також виявленні температурні зони, які відповідають вивільненню вологи з різною формою і енергією зв'язку. В інтервалі температур 337 ... 394К починається вивільнення незначної частини слабо зв'язаної адсорбційної вологи полімолекулярних шарів всередині частинок продукту, а при температурі 396...456 К може відбуватися деструкція речовини. Пік ендотермічного ефекту при 396К, що супроводжується закінченням інтенсивної втрати маси, відповідає вивільненню молекул води і видалення газоподібних фракцій. При температурі продукту понад 396К відбувається початок розпаду речовин топінамбура. При нагріванні топінамбура до 496К загальна втрата маси зразка становить 80,42% (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Температури початку розпаду речовин топінамбура

Структурні зміни	Температура топінамбура, К
Вивільнення основної маси вологи, ТВ	338
Початок деструкції речовини продукту, Т _D	398

З аналізу гігроскопічних і вологопереносних властивостей коренеплодів, видно, що вони являють собою високовологий продукт з низькими коефіцієнтом теплопровідності і температуропровідності.

Оптичні властивості коренеплодів. Дослідження багатьох вчених [22,23,32,37,38 та ін.] Показали, що кількість колоїдні капілярно-пористі тіла, до яких відносяться і коренеплоди, мають чітко виражену селективність до поглинання ІЧ-променів в діапазоні ІЧ-спектра. У зв'язку з цим джерела випромінювання слід підбирати, виходячи з конкретних оптичних властивостей (коефіцієнт відбиття, поглинання і пропускання) даного матеріалу, з урахуванням конструктивних особливостей і енергетичної характеристики апарату. Для забезпечення об'ємного прогріву продуктів необхідно визначити діапазон довжин хвиль інфрачервоного спектра, в межах якого продукт має найменшу відбивну і найбільшу поглинальну здатності. Кореляція спектральних терморадіаційної характеристик матеріалу з емісійними характеристиками ІЧ-випромінювача дозволяє обґрунтувати раціональні режими його роботи [34].

Терморадіаційні характеристики об'єктів залежать від багатьох факторів: вологості і температури, переважної форми зв'язку вологи з матеріалом, його структури, полів вологовмісту в об'єкті і т.д.

Для технічної оцінки можливості радіаційного нагріву необхідно знати глибину проникнення ІЧ-випромінювання в продукт. У таблиці 1.6 наводяться орієнтовні дані різних авторів по проникності короткохвильового-го випромінювання в глибину різних матеріалів [34].

Таблиця 1.6 – Проникність короткохвильового випромінювання

Продукт	λ_{\max}	Глибина проникнення, мм
Морква	0,88	1,5
Картопля сиря	~ 1,00	6
суха	0,88	15-18

О. Крішером проведені дослідження по визначенню оптичних властивостей вологих рослин в діапазоні інфрачервоного випромінювання [21]. Оптичні властивості рослин наведені на рисунку 1.2. Тут дано спектральний розподіл коефіцієнта відображення R і коефіцієнта поглинання A рослин для спектральної області від 0,5 до 9 мкм.

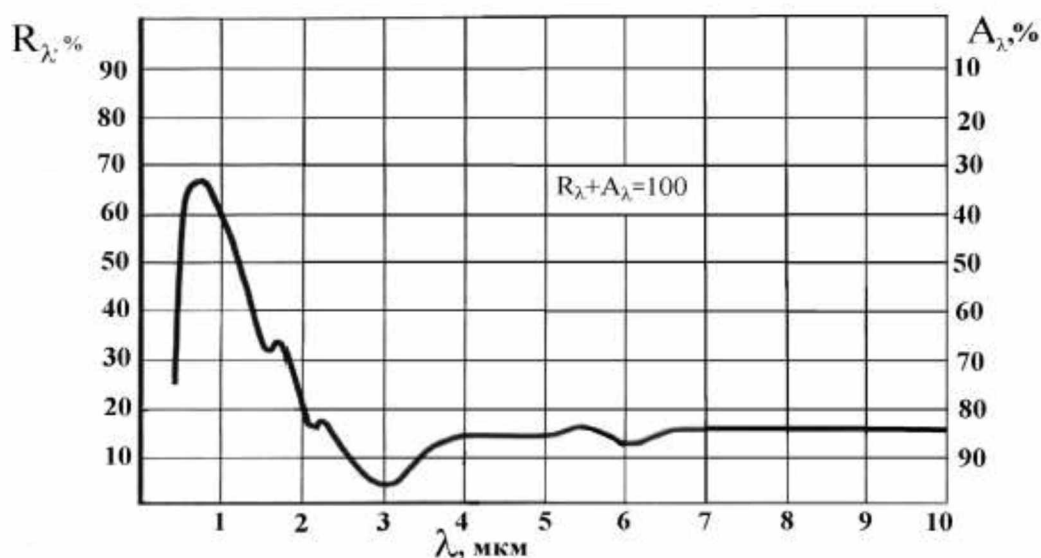


Рисунок 1.2 – Поглинальна і відбивна здатність рослин

Коефіцієнт поглинання рослин у видимій області має значення біля 35%, потім збільшується, досягаючи свого максимального значення при 3 мкм.

Надалі коефіцієнт поглинання при довжині хвилі понад 3 мкм зменшується незначно. При узгодженні оптичних властивостей коренеплодів моркви зі спектральними характеристиками ІЧ-випромінювачів в даних дослідженнях були отримані аналогічні результати, які показали, що коренеплоди моркви мають максимальну поглинальну здатність в діапазоні 2,8-3,2 мкм.

1.3 Біотехнічні аспекти нагріву коренеплодів

Як відомо, чим швидше проводиться сушіння, тим вище якість напівфабриката. Швидкість сушіння багато в чому залежить від температури теплоносія. За даними досліджень В.Ю. Валушіса залежність втрат каротину від нагрівання коренеплодів моркви приведена на рисунку 1.3 [5].

Аналогічні дані отримані при дослідженнях в цій роботі. З наведеного графіка видно, що відносно невелике підвищення температури в процесі сушіння призводить до значних втрат каротину. Підвищення температури нагріву коренеплодів моркви в процесі сушіння з 60°C до 70°C приводить до втрат каротину в 5 разів. Виходячи з цього, в процесі сушіння повинен бути поставлене такий температурний режим ІЧ-нагріву для коренеплодів, який буде оптимальним, в залежності від їх біохімічних, геометричних і теплофізичних властивостей.

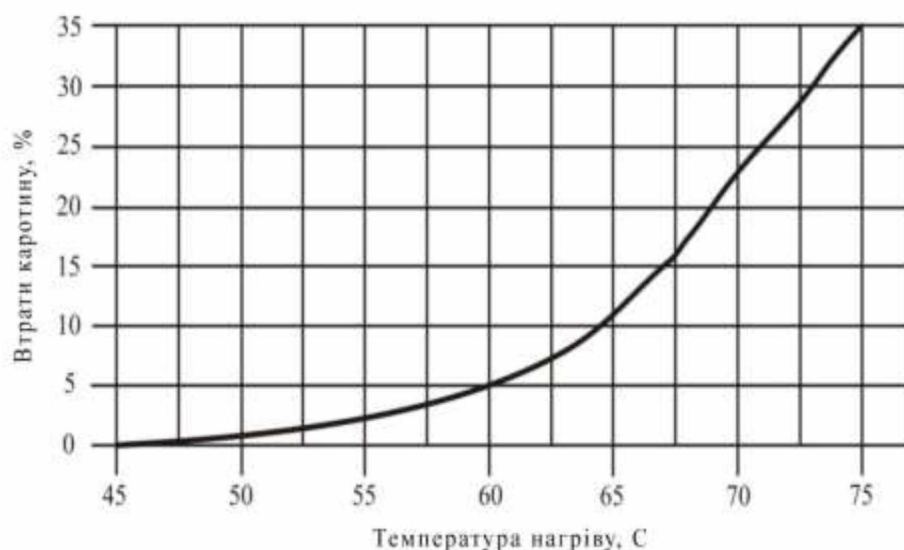


Рисунок 1.3 - Залежність втрат каротину від температури нагріву

Режим сушіння характеризується температурним рівнем процесу, тобто початковою і кінцевою температурами сушки. Цей параметр впливає не тільки на тривалість сушіння, а й на збереження вітамінів і мікроелементів, а значить на якість висушеного матеріалу.

Криві змісту каротину в коренеплодах моркви, в залежності від температури середовища і тривалості перебування в ній, на рисунку 1.4 показують, що в процесі сушіння при високій температурі в міру висихання продукти повинні переміщатися в зону з більш низькою температурою сушки [5].

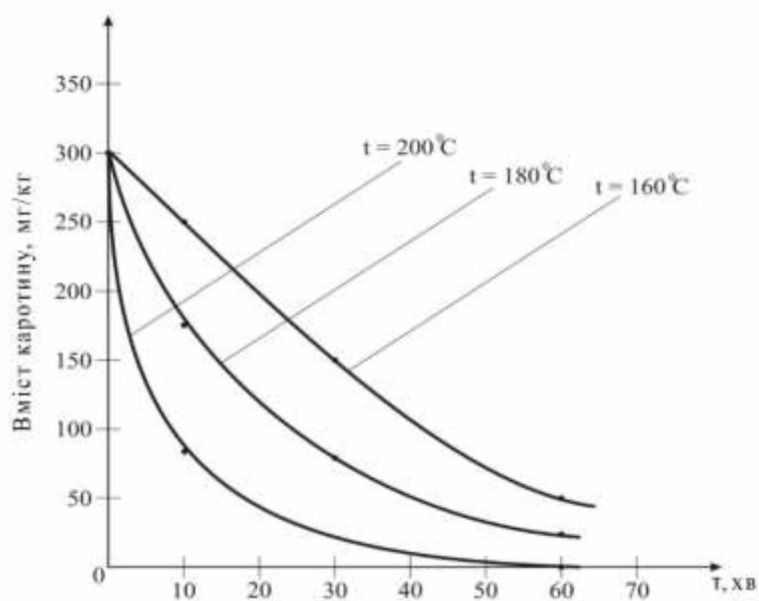


Рисунок 1.4 – Вплив температури середовища і тривалості перебування в ній на втрати каротину в коренеплодах моркви

При виборі допустимої температури в процесі сушіння необхідно враховувати час перебування продукту в середовищі даної температури. На початку сушіння високовологих матеріалів, коли вони мають вільну вологу, будь-яка температура безпечна, так як в цей період частки можуть нагріватися до граничної температури або незначно перевищувати її. Небезпечний кінцевий період сушіння, коли випаровується пов'язана волога, і матеріал може перевищувати допустиму температуру.

1.4 Висновки до першого розділу

1. Найбільш перспективним способом тривалого зберігання сільськогосподарської сировини, з максимальним збереженням вітамінів і мікроелементів є сушка. Аналіз різних методів показує, що ІЧ-сушка за енерговитратами і технологічними можливостями в більшій мірі відповідає вимогам сушки коренеплодів.

2. Аналіз методів, технологій і техніки сушіння сільськогосподарської сировини показав, що найбільш ефективним є застосування обладнання, що працює на принципі інфрачервоного випромінювання. Дане обладнання має більш високий ККД, просте в експлуатації і управлінні, надійне, має менші питомі показники енергоспоживання і, як правило, є екологічно чистим.

3. Процес сушіння повинен базуватися на вивченні теплофізичних і оптичних властивостей сировини, дослідженні закономірностей даного процесу, вибору на цій основі типів випромінювачів, визначенню ефективних режимів енергопідводу, закономірності внутрішнього і зовнішнього тепломасообміну сировини, а також сучасному вченні про форми зв'язку вологи з матеріалом .

2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Задачі теоретичних досліджень

При сучасному стані проблеми застосування технології сушіння цукровмісних коренеплодів ІЧ-нагріванням для отримання продуктів високої біологічної активності, найбільш ефективною є методика поетапного проведення експериментальних робіт.

Експериментальні дослідження склалися з декількох послідовних і взаємопов'язаних етапів.

На першому етапі досліджень здійснюється визначення теплофізичних і терморадіаційних характеристик коренеплодів, побудовані криві нагріву коренеплодів і поверхні відгуку температурного поля випромінювачей.

На другому етапі встановлювались взаємозв'язки фізико-хімічними та органолептичними показників коренеплодів і режимами ІЧ-енергопідводу. При цьому визначались режими ІЧ-енергопідводу, що впливають на зміст і динаміку зміни активно діючих речовин і вологи в сушених коренеплодах, а також досліджувався вплив режимів інфрачервоного сушіння на енергетичні затрати, що визначає ефективні режими ІЧ-енергопідводу.

На наступному, третьому етапі, на основі апріорної інформації і попередніх досліджень проводяться досліди на спеціальних установках випробувального типу. На цьому етапі уточнюються оптимальні режими процесу ІЧ-сушіння коренеплодів і найбільш енергозберігаючі методи ІЧ-енергопідводу, визначаються шляхи інтенсифікації технологічних процесів шляхом використання схем об'ємного опромінення, розраховуються основні техніко-економічні показники різних режимів і засобів управління ІЧ-енергопідводом.

При виконанні досліджень використані методи математичного моделювання і математичної обробки результатів. Дослідження проводились з п'ятикратною повторністю. Всі результати оброблені методами математичної статистики і є достовірними.

2.2 Математична обробка результатів досліджень

Для ефективного проведення експериментальних досліджень доцільно провести активне планування експерименту і виконати математичну обробку результатів досліджень.

При плануванні експерименту вирішується завдання раціонального вибору чинників, що впливає на об'єкт дослідження, визначення відповідного числа проведених дослідів. Збільшення числа включених в розгляд чинників призводить до різкого зростання числа дослідів, зменшення - до істотного збільшення похибки досвіду. Фактор вважається заданим тоді, коли при його виборі вказується його область визначення - сукупність значень, які може приймати даний фактор. В даному випадку вхідні параметри варіюються на трьох рівнях: мінімальному (-1), середньому (нульовому) (0), максимальному (+1). Нехай x_1 - перший фактор, а x_2 - другий фактор, тоді залежність вихідних параметрів від вхідних виразиться таким рівнянням [2]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_2x_1, \quad (2.1)$$

Так як для проведення експерименту необхідний план з мінімальною кількістю дослідів при трьох рівнях, був обраний стандартний план двухфакторного експерименту. Матриця плану представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Матриця стандартного плану

№ варіанту	Кодування значень факторів		
	x_1	x_2	y_u
1	0	+1	y_1
2	+1	0	y_2
3	-1	-1	y_3
4	-1	0	y_4
5	0	-1	y_5
6	+1	+1	y_6
7	+1	-1	y_7
8	0	0	y_8
9	-1	+1	y_9
10	Контроль		y_{10}

У планах другого порядку кожна з незалежних змінних повинна приймати не менше трьох значень. Результати спостережень експерименту відповідно варіантів

варіювання плану записуються в матрицю для проведення дисперсійного аналізу, а потім і регресійного аналізу.

Введення кодованих змінних з алгебраїчної точки зору, відображає прагнення до організації систем функції, до спрощення розрахунків оцінок коефіцієнтів моделі, до створення стандартизованого набору оптимальних планів, незалежних від структури об'єкта дослідження [2].

Для виключення впливу систематичних помилок, які можуть бути викликані різними зовнішніми умовами, досліди рознесені в часі, при цьому використана таблиця випадкових чисел.

Обробка експериментальних даних проводилася за методом множинної регресії в програмному продукті STATISTICA. Метод полягає в тому, щоб мінімізувати суму квадратів відрізків, що характеризують розходженням між експериментальними точками і отриманим рівнянням.

Для руху до точки оптимуму складалася лінійна модель [2]

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k, \quad (2.2)$$

Для довільного числа факторів коефіцієнти будуть визначатися [2]

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ji}}{N} \quad (2.3)$$

де $j = 0, 1, 2, \dots, k$ – кількість факторів.

Так як кожен фактор варіюється на трьох рівнях $+1, 0, -1$, то обчислення зводяться до приписування одну Y знаків відповідного фактору стовбця і алгебраїчному додаванню отриманих значень. Розподіл результату на число дослідів в матриці планування дає шуканий коефіцієнт.

При перевірці гіпотези про придатність моделі або про значущість коефіцієнтів, використовувався один з статистичних методів - регресійний аналіз.

Перевірка відтворюваності експерименту [2]:

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y_{uk} - y_{ucp})^2. \quad (2.4)$$

Гіпотеза об однорідності не відкидається, якщо виконується нерівність [2]:

$$\frac{s_{\max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G(n-1; N), \quad (2.5)$$

де s_{\max}^2 - найбільше з обрахованих значень підстрочних дисперсій,

$G(n-1; N)$ - табличне значення критерію Кохрена при рівні значимості 0,05 с з числом степеней вільності $f_1 = (n-1)$ та $f_2 = N$.

Дисперсія знаходиться у кожному досліді [2]

$$s_y^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1} \quad (2.6)$$

де $(n-1)$ - число степеней вільності, що дорівнює кількості дослідів мінус одиниця;

y_q - результат окремого досліді;

\bar{y} - середнє арифметичне усіх результатів.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}. \quad (2.7)$$

Після обчислення коефіцієнтів перевіряють адекватність отриманої моделі з використанням критерію Фішера [2]:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_m(f_2; f_1), \quad (2.8)$$

де s_{ad}^2 - дисперсія адекватності чи залишкової дисперсії;

F_T - критерій Фішера.

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}, \quad (2.9)$$

де f - число степеней вільності;

$\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2$ - залишкова сума квадратів.

$$f = N - (k + 1). \quad (2.10)$$

Зручність використання критерію Фішера пояснюється тим, що перевірка гіпотези можна здійснити шляхом порівняння з табличним значенням. У технічних завданнях застосовується рівень значущості 0,05. Якщо розраховане значення критерію Фішера не є більшим від табличного, то з високою довірчою ймовірністю модель можна вважати адекватною. При перевищенні табличного значення цю гіпотезу доводиться відкидати.

Перевірка значущості кожного коефіцієнта проводилася незалежно по t-критерієм Стюдента, а також побудовою довірчих інтервалів.

Перш за все, знаходиться дисперсія коефіцієнта регресії

$$s_{bj}^2 = \frac{s_y^2}{N}, \quad (2.11)$$

та довірчий інтервал (Δb_j) :

$$(\Delta b_j) = \pm t s_{bj} \quad (2.12)$$

де t – табличне значення критерію Стюдента при числі степеней вільності, з якими визначалось s_y^2 та вибраному рівні значимості;

s_{bj} - квадратична помилка коефіцієнту регресії.

$$S_{bj} = \sqrt{s_{bj}^2}. \quad (2.13)$$

Критерій Стюдента також використовували для відкидування помилкових дослідів

$$t \leq \frac{y - \bar{y}}{s}. \quad (2.14)$$

Досвід вважається бракованим, якщо експериментальні значення критерію t по модулю було більше табличного значення.

2.3 Методика і техніка визначення терморадіаційних характеристик коренеплодів

Різні колоїдні капілярно-пористі тіла, до яких відносяться і коренеплоди, мають чітко виражену селективність до поглинання ІЧ-випромінювання в діапазоні довжин хвиль інфрачервоного спектра. Отже, джерела через опромінення слід підбирати,

виходячи з конкретних терморадіаційних характеристик даного матеріалу з урахуванням конструктивних особливостей і енергетичної характеристики обладнання.

Для визначення спектральних терморадіаційних характеристик коренеплодів були використані аналоговий і цифровий прилади, загальний вигляд яких відображені на рисунках 2.1 та 2.2.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд аналогового приладу

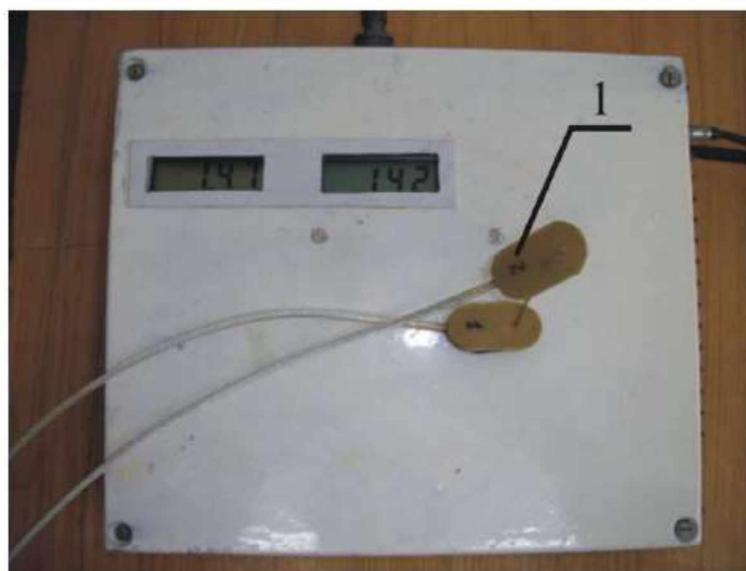


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд цифрового приладу: 1 – напівпровідниковий мікротерморезистор типу МТ-54

Спектральні терморадіаційні характеристики визначалися за такою методикою. В основі закладена ідея вимірювання температури на двох різних рівнях оброблюваного матеріалу. В якості температурного елементу використовувався напівпровідниковий мікротерморезистор типу МТ-54. Постійна часу нагрівання цього мікротерморезистору дорівнює 500 мкс, тому вимірювання температури можна здійснювати протягом 2-3 секунд. Оскільки електронний підсилювач має лінійну характеристику, то показання приладів n і щільність потоку проникаючого випромінювання I_x пов'язані наступною залежністю:

$$I_x = n \cdot K, \quad (2.15)$$

де K – постійна приладу (при використанні даної методики можна прийняти $K=1$).

Терморадіаційні характеристики коренеплодів при різних джерелах випромінювання досліджувалися на лабораторному стенді (рис. 2.3).

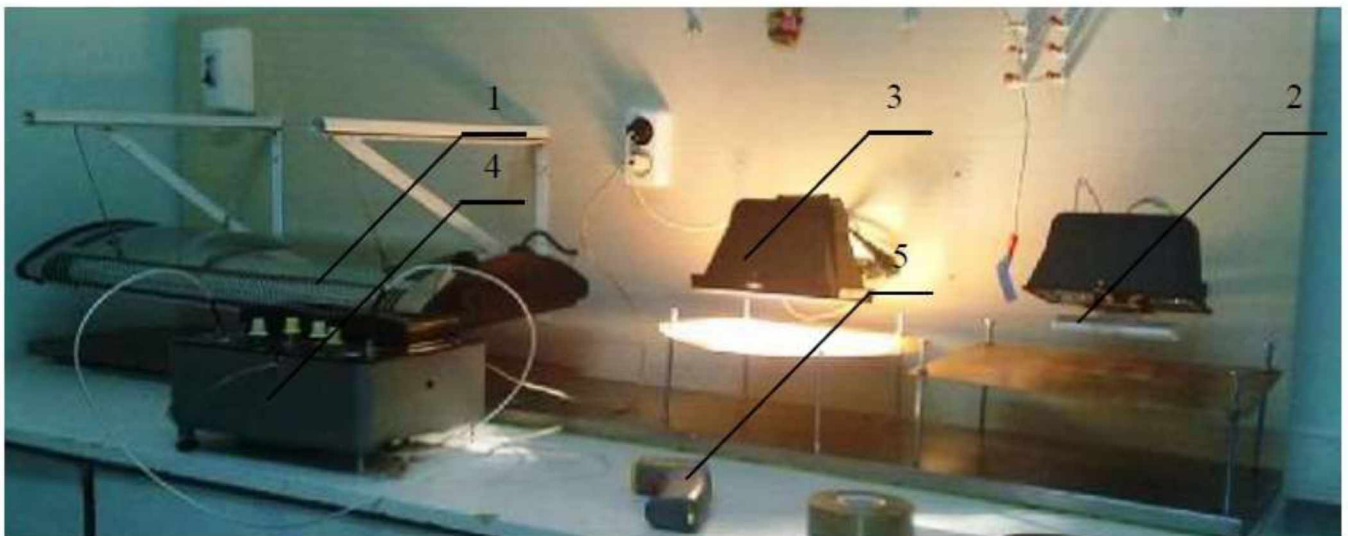


Рисунок 2.3 - Лабораторний стенд для проведення порівняльних досліджень терморадіаційних характеристик коренеплодів: 1 - довгохвильовий опромінювач; 2 - середньохвильовий керамічний імпульсний ГЧ опромінювач типу ECS-2; 3 - короткохвильовий опромінювач, який представляє собою галогенну лампу; 4 - аналоговий прилад для визначення терморадіаційних характеристик коренеплодів; 5 - ІК-термометр.

Основна частина обладнання і пускозахисна апаратура змонтована на стелажі. Для проведення експерименту очищені коренеплоди, з початковою вологістю,

нарізалася на кружки товщиною 2-3 мм, товщина шару варіювалася від 5 до 30 мм з інтервалом 5 мм.

Температура випромінювачів і продукту контролювалася за допомогою лазерного термометра (рис. 2.4).

Виконавши вимірювання в момент опромінення випробуваного зразка, можна визначити коефіцієнт поглинання [27]:

$$A_{\lambda} = \frac{2.31g \frac{n_1}{n_2}}{\Delta x}, \quad (2.16)$$

де n_1 – показання першого мікроамперметра;

n_2 – покази другого мікроамперметру;

Δx – товщина шару матеріалу, м.

$$T_{\lambda} = \frac{n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

Коефіцієнт відбиття [27]

$$R_{\lambda} = 1 - (T_{\lambda} + A_{\lambda}). \quad (2.18)$$

Довгохвильовий і короткохвильовий випромінювач змонтовані на спеціальних підвісках, які дозволяють регулювати відстань між випромінювачем і опромінюється матеріалом.



Рисунок 2.4 – Лазерний термометр

Для вимірів електротехнічних параметрів використовувався електричний мультиметр. За допомогою цього приладу проводили виміри напруги, що підводиться

до опромінювача, а також показники споживаного струму. За цими показниками здійснювався розрахунок потужності.

При обробці результатів експериментів використовувались статистичні методи з використанням персонального комп'ютера з встановленим відповідним програмним софтом по обробці статистичної інформації.

2.4 Лабораторна установка для сушіння за допомогою промінистого теплообміну

З метою вдосконалення процесу сушіння, реалізації та перевірки висунутих теоретичних положень була розроблена, виготовлена і досліджена ІЧ-установка, конструктивно-технологічна схема якої приведена на рисунку 2.5. Каркас установки виготовлений з вуглецевої сталі. Обшивка виконана листовою сталлю із застосуванням сучасних теплоізоляційних матеріалів. У нижній частині установки розташований відцентровий вентилятор Ц4-80. Апаратура і пульт управління змонтовані в окремому відсіку, що обдувається повітряним потоком відцентрового вентилятора. У квадратній камері установки 1×1 м розміщені ІЧ-випромінювачі. Як випромінювачів в даній установці досліджені наступні види нагрівальних елементів: ніхромова спіраль, трубчасті електронагрівачі, імпульсні керамічні нагрівальні елементи. Для встановлення режимів обробки в даній установці застосовувався виготовлений в лабораторії перемикач рівнів потужності і регулятор рівнів потужності. Для контролю температурних параметрів застосовувалися терморпари і регулятор типу - ОВЕН ТРМ251.

Згідно з основною ідеєю електротермічною обробки, досліджуваний матеріал необхідно висушити до залишкової вологості 10-13% з максимальним вмістом активно діючих речовин.

В ході попередніх досліджень було встановлено, що морква з початковою вологістю 85-90% шляхом застосування імпульсно-перериваного ІЧ-опромінення, досягає залишкової вологості 10-15% при максимальному збереженні активно діючих речовин, в середньому за 160-170 хв при спадаючому рівні енергопідводу. Даний режим прийнятий як «ефективний». Вхідні параметри варіювалися на трьох рівнях і

було обрано такі: x_1 - режим ІЧ-енергопідводу (якісний фактор), x_2 - час сушки, хв (кількісний фактор). Рівні факторів та інтервали варіювання представлені в таблиці 2.2.

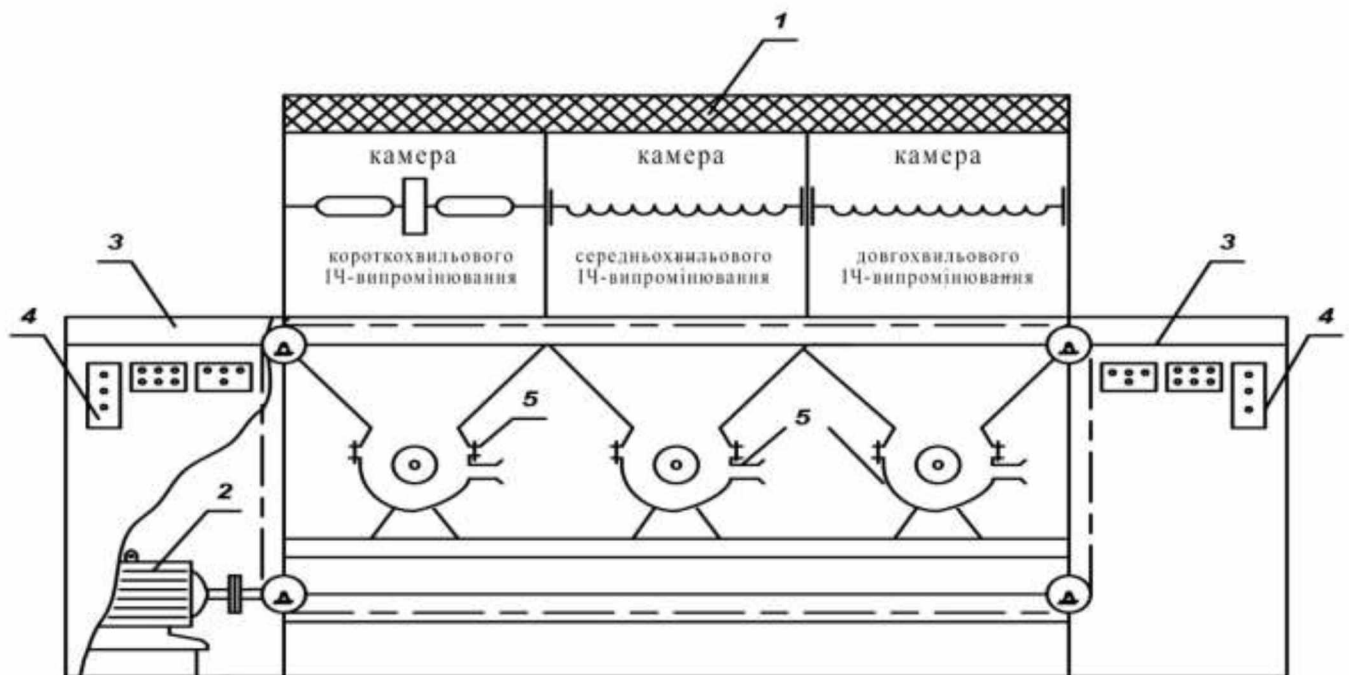


Рисунок 2.5 - Конструктивна схема ІЧ-установки: 1 - відбивач; 2 - електродвигун приводу ланцюга; 3 - стіл завантажувально-розвантажувальний; 4 - пульт управління; 5 - вентилятор відцентровий

Досліди проводились за кількома варіантами, що передбачала комбінацію кількох факторів впливу, а саме режиму ІЧ-енергопідводу та тривалості сушіння (табл. 2.3).

На рисунку 2.6 наведено загальний вигляд сушильної камери виробничо-експериментальної ІЧ-установки в процесі сушіння коренеплодів.

Експерименти проводилися наступним чином. Очищені від бруду і вимиті на мийній машині коренеплоди подрібнювалися за допомогою овочерізки. Потім розкладалися на лотках і розміщувалися в сушильній камері. Подрібненні коренеплоди піддавалися випромінюванню:

- з постійним енергетичним рівнем, тобто час роботи ІЧ-опромінювача в циклі перериваного опромінення було постійним;
- зі спадаючим енергетичним рівнем, тобто зі зменшенням часу роботи ІЧ-опромінювача в циклі перериваного опромінення;

- зі зростаючим енергетичним рівнем, тобто зі збільшенням часу роботи ІЧ-опромінювач в циклі перериваного опромінення.

Таблиця 2.2 - Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
x ₁ – режим енергопідводу	З підвищенням рівня енергопідводу (-1)	З постійним рівнем енергопідводу (0)	З пониженим рівнем енергопідводу (+1)	-
x ₂ – час сушіння, хв	140	160	180	25

Таблиця 2.3 - Рівні факторів та інтервали варіювання

Варіант	Режим ІЧ-енергопідводу	Час сушіння, хв
1	з постійним	190
2	з пониженим	170
3	з підвищенням	150
4	з підвищенням	170
5	з постійним	150
6	з пониженим	190
7	з пониженим	150
8	з постійним	170
9	з підвищенням	190
10	Контроль	

Опромінення коренеплодів вимірювалася за допомогою альбедометр, підключеного до гальванометра ДСА, а також визначалася розрахунковим шляхом з формули Н.Н. Ермолинського, яка показує залежність між щільністю потужності і опроміненням:

$$\frac{P}{F} = \frac{A_{\lambda} \cdot E}{KПВ_{\phi} \cdot \eta} \quad (2.19)$$

Звідкіля величина опромінення:

$$E = \frac{P}{F} \cdot \frac{KПВ_{\phi} \cdot \eta}{A_{\lambda}} \quad (2.20)$$

де P/F – щільність потоку, Вт/м²;

η – коефіцієнт корисної дії джерела опромінення;

$KПВ_{\phi}$ - коефіцієнт використання потоку ІЧ-випромінення;

A_{λ} – умовний коефіцієнт поглинання коренеплодів.



Рисунок 2.6 - Загальний вигляд сушильної камери виробничо-експериментальної ІЧ-установки в процесі сушіння коренеплодів

Його значення буде дійсним для коренеплодів вологістю від 20 до 80%. Зі збільшенням початкової вологості вибір коефіцієнту поглинання здійснюється у більшу сторону.

Значення КПВ_φ та η приведені у працях В.Н. Карпова [29].

Зв'язок між опроміненням E та граничної температури T_{max}:

$$T_{\max} = T_o + \frac{A \cdot E}{\alpha \cdot F}, \quad (2.21)$$

де T_o – температура оточуючого повітря;

A – поглинальна здатність;

α – коефіцієнт теплопередачі конвекції;

F – площа поверхні, що приймає участь в теплообміні між сировиною та повітрям.

Аналогічна методика застосована до сушіння буряку і топінамбура, з конкретними для кожного продукту вихідними і кінцевими даними.

На кожному етапі виконання експериментів визначальне значення піддавалась контролю граничної температури сировини, за допомогою системи підтримки оптимального температурного діапазону при нагріванні не вище + 60 ° С і при паузі не нижче + 30 ° С.

2.5 Методика визначення вологості в коренеплодах

Визначення вологості. Типовий метод аналізу вмісту води в рослинах до і після переробки полягав в висушуванні наважки в сушильній шафі або в ІЧ-вологомірі при температурі 105°С. Для цього з маси відбиралися сирі проби (не менше трьох), які розміщалися в алюмінієві бюкси.

Перед відбором проб бюкси ретельно очищалися від пилу, прожарювалися, охолоджувалися і зважувалися. Зважування проводилося на аналітичних вагах типу АДВ-200 М. Вологість проби визначалася за такою формулою:

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_6}, \quad (2.22)$$

де M₁ – маса проби з бюксом до сушіння, г;

M₂ – маса проби з бюксом після сушіння, г;

M₆ – маса бюкси, г.

Знаючи вологість, вологовміст визначається за виразом

$$U = \frac{W}{100 - W} \cdot 100. \quad (2.23)$$

2.6 Висновки до другого розділу

1. Розроблені алгоритми проведення експериментальних досліджень процесу інфрачервоного сушіння дозволили визначити послідовність виконання робіт для знаходження ефективних режимів управління ІЧ-енергопідводу.

2. Визначено, що ефективним буде такий режим, при якому швидкість нагрівання і температура продуктів не перевищують допустимих значення, що визначаються біотехнічними умовами, час сушки мінімально, а продукти мають високі якісні показники.

3. 3. Розроблено методику визначення терморадіаційних характеристик коренеплідів, що впливають на якісні показники продуктів високої біологічної активності.

4. Розроблена і виготовлена лабораторна установка, що реалізує ефективні режими управління, і дозволяє отримувати продукти високої біологічної активності.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Дослідження терморадіаційних характеристик

Узгодження спектральних характеристик ІЧ-випромінювачів і оптичних властивостей матеріалів є важливим фактором, що визначає вибір ефективних методів управління ІЧ-енергопідводом. Характеристики випромінювачів і оптичні властивості матеріалів роблять визначальний вплив на якісні показники висушених коренеплодів, узгодження даних параметрів необхідно для виконання біотехнічних умов нагріву і отримання продуктів високої біологічної активності. Терморадіаційні характеристики коренеплодів залежать від вологості і температури, переважної форми зв'язку вологи з матеріалом, структури речовини, полів вологовмісту в об'єкті і стану поверхні. Щоб забезпечити об'ємний прогрів продуктів необхідно визначити діапазон довжин хвиль спектра інфрачервоного імпульсного випромінювання, в межах якого продукт має найменшу відбивну і найбільшу поглинальну здатність. Кореляція спектральних терморадіаційних характеристик коренеплодів з енергетичними характеристиками ІЧ-випромінювачів дозволяє обґрунтувати ефективні режими ІЧ-енергопідводу. Технологічні вимоги ставлять умови щодо визначення інтенсивності проникності ІЧ-випромінювання в процесі імпульсного інфрачервоного сушіння коренеплодів. У зв'язку з цим були встановлені залежності, що відображають проникність ІЧ-випромінювання в коренеплоди різної товщини різними джерелами випромінювання.

Експериментальні значення різних джерел випромінювання, що були виміряні цифровим і аналоговим приладами, представлені в таблиці 3.1 і 3.2.

Шляхом підстановки отриманих даних в формулу (2.17) визначені значення, на основі яких побудовані залежності спектрального коефіцієнту пропускання коренеплодів від товщини шару (рис. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Досліди показали, що проникність коренеплодів при опроміненні короткохвильовим ІЧ-випромінюванням при товщині шару 5 мм в 1,4-1,9 рази вище, ніж при опроміненні середньохвильового ІЧ-випромінюванням. Однак при збільшенні товщини шару дана відмінність

згладжується і на глибинах 20-30 мм різниця між проникністю «короткохвильових» і «середньохвильових» ІЧ-випромінювачів становить 5-10%.

Таблиця 3.1 - Експериментальні значення, виміряні аналоговим приладом

Товщина шару, мм	Показання мікроамперметрів μA_1 і μA_2 та спектрального коефіцієнту пропускання для різних джерел ІЧ-випромінювачей					
	короткохвильовий		$T_\lambda, \%$	середньохвильовий		$T_\lambda, \%$
	μA_1	μA_2		μA_1	μA_2	
Морква						
5	270	167	61	230	97	41
10	270	121	42	230	73	31
15	270	88	31	230	61	26
20	270	65	22	230	49	21
25	270	48	18	230	41	15
30	270	38	15	230	34	14
Топінамбур						
5	270	177	62	230	111	44
10	270	113	41	230	81	33
15	270	87	32	230	64	27
Буряк						
5	270	171	62	230	101	41
10	270	108	38	230	74	31
15	270	79	29	230	61	25

Таблиця 3.2 - Експериментальні значення, виміряні цифровим приладом

Товщина шару, мм	Показання мікроамперметрів μA_1 і μA_2 та спектрального коефіцієнту пропускання для різних джерел ІЧ-випромінювачей					
	короткохвильовий		$T_\lambda, \%$	середньохвильовий		$T_\lambda, \%$
	μA_1	μA_2		μA_1	μA_2	
Морква						
5	1000	6580	58	9600	3700	38
10	1000	5610	43	9600	2800	29
15	1000	3560	32	9600	2300	23
20	1000	3400	27	9600	1800	19
25	1000	2980	18	9600	1500	15
30	1000	2650	14	9600	1200	12

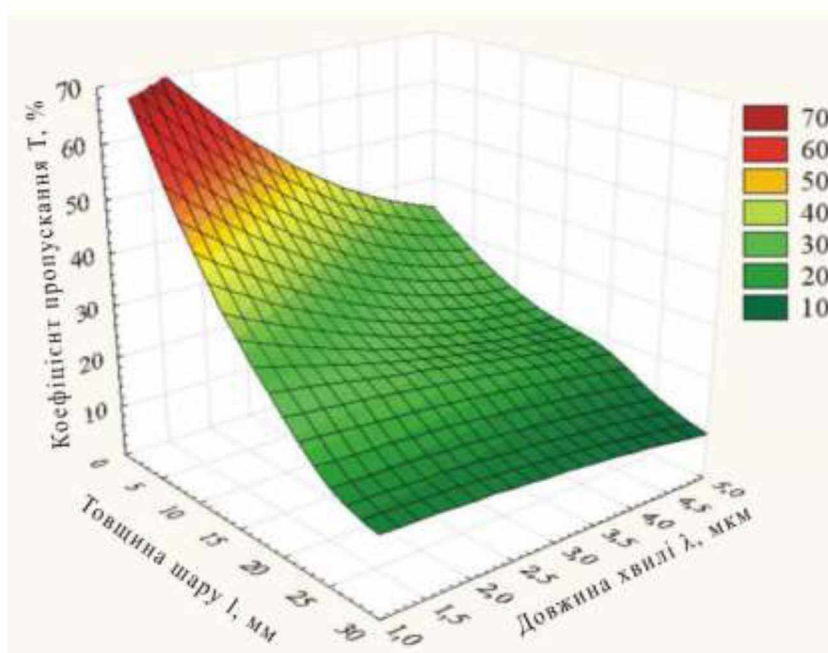


Рисунок 3.1 – Залежність спектрального коефіцієнту пропускання коренеплодів моркви від товщини шару та довжини хвилі, виміряна цифровим приладом

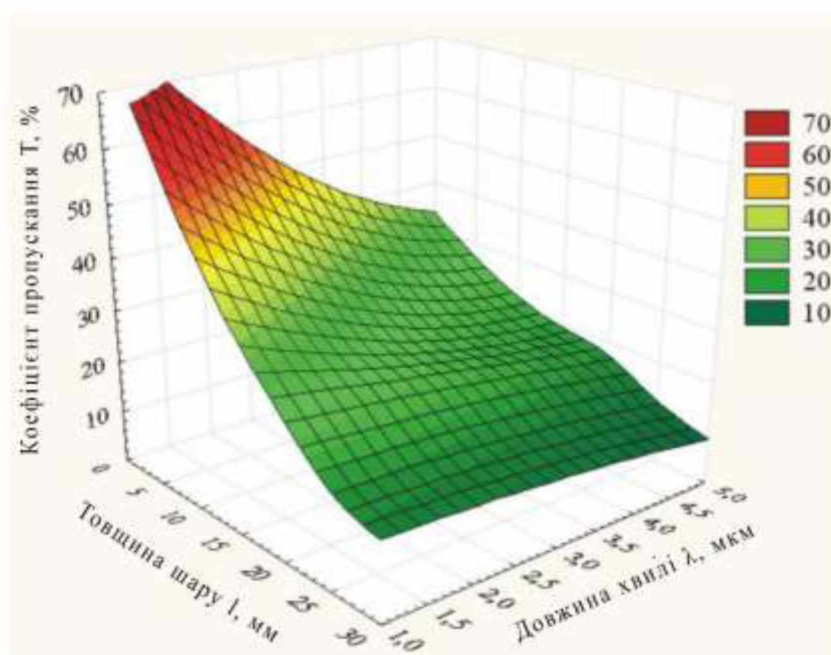


Рисунок 3.2 – Залежність спектрального коефіцієнту пропускання коренеплодів моркви від товщини шару та довжини хвилі, виміряна цифровим приладом

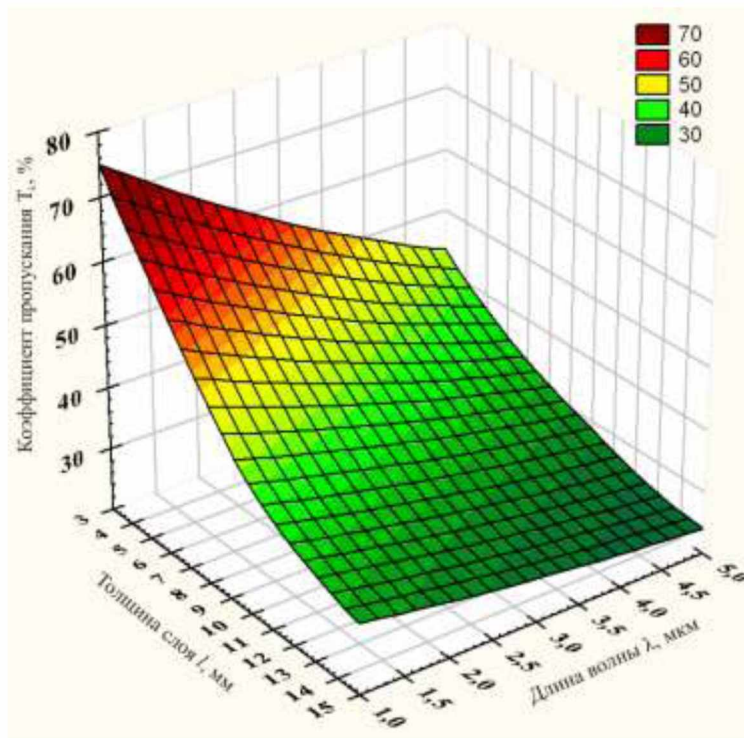


Рисунок 3.3 – Залежність спектрального коефіцієнту пропускання коренеплодів топінамбура від товщини шару та довжини хвилі

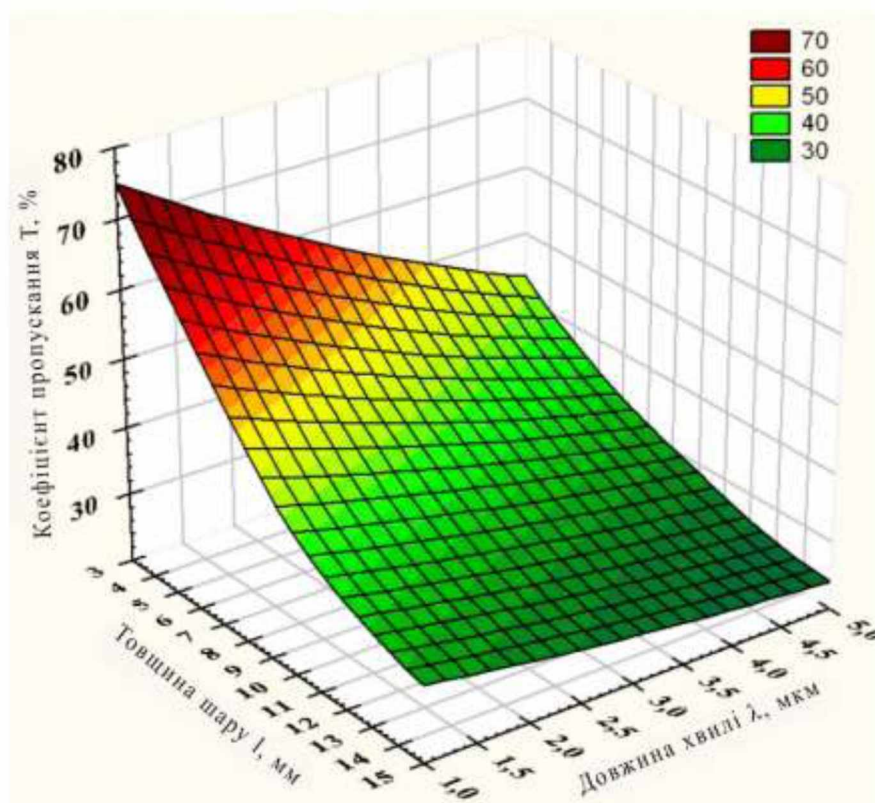


Рисунок 3.4 – Залежність спектрального коефіцієнту пропускання коренеплодів буряку від товщини шару та довжини хвилі

Вимірювання для різних джерел випромінювання узгоджуються і показують, що для процесів інфрачервоного сушіння коренеплодів оптимальною товщиною шару сировини нарізаного соломкою буде 1,5 - 2,5 см. Аналіз отриманих даних показує, що в процесі сушіння коренеплодів інтенсивне поглинання енергії інфрачервоного випромінювання спостерігається в області спектра від 2,8 мкм до 3,3 мкм. Отже, для процесу сушіння даного виду сировини доцільно використовувати середньохвильові імпульсні керамічні ІЧ-випромінювачі, що працюють в даній області спектра.

3.2 Дослідження технологічних параметрів нагріву коренеплодів

Для підтвердження аналітичних положень обрання ефективних джерел ІЧ-випромінювання для термообробки коренеплодів, проведені досліди з різноманітними джерелами інфрачервоного випромінювання з використанням експериментальної установки. Порівняння проводилося між ІЧ-випромінювачами, різного діапазону випромінювання і різними режимами енергопідводу. Криві нагрівання представлені на рисунках 3.5 - 4.8.

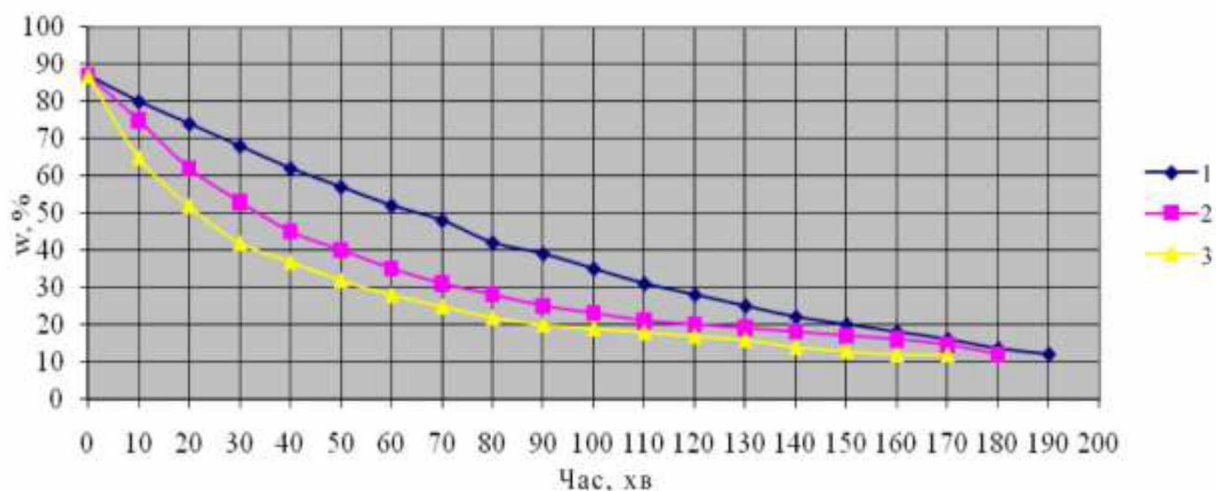


Рисунок 3.5 – Криві нагріву з імпульсними керамічними нагрівачами 1 – з підвищенням рівня енергопідводу, 2 – з постійним рівнем енергопідводом, 3 – з пониженим рівнем енергопідводом.

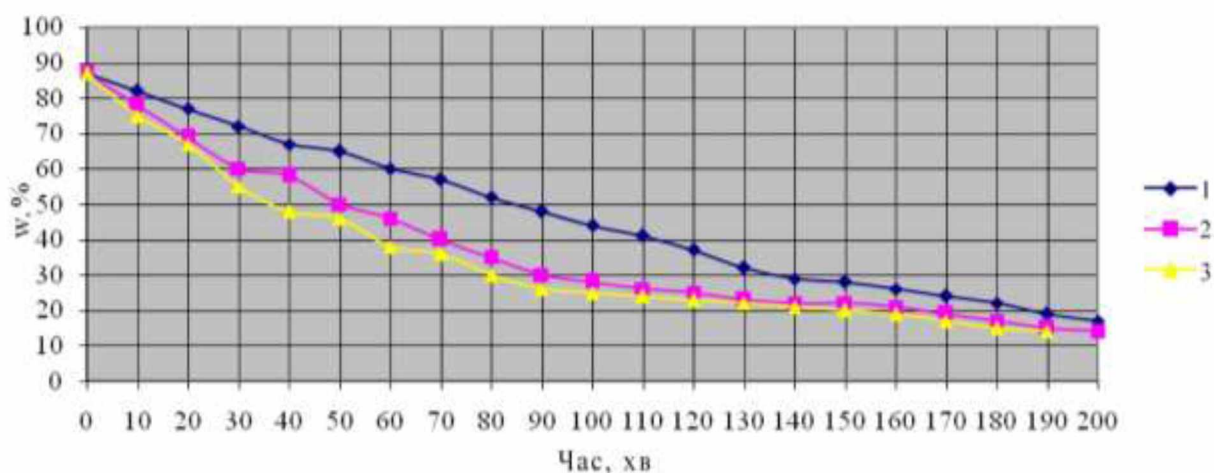


Рисунок 3.6 – Криві нагріву з трубчастими електронагрівачами

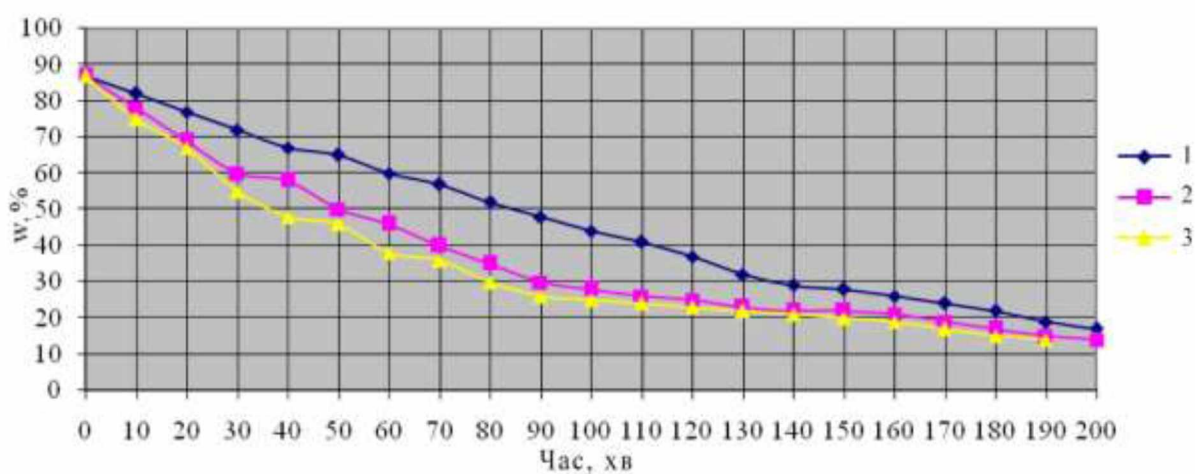


Рисунок 3.7 – Криві нагріву з ніхромовою спіраллю

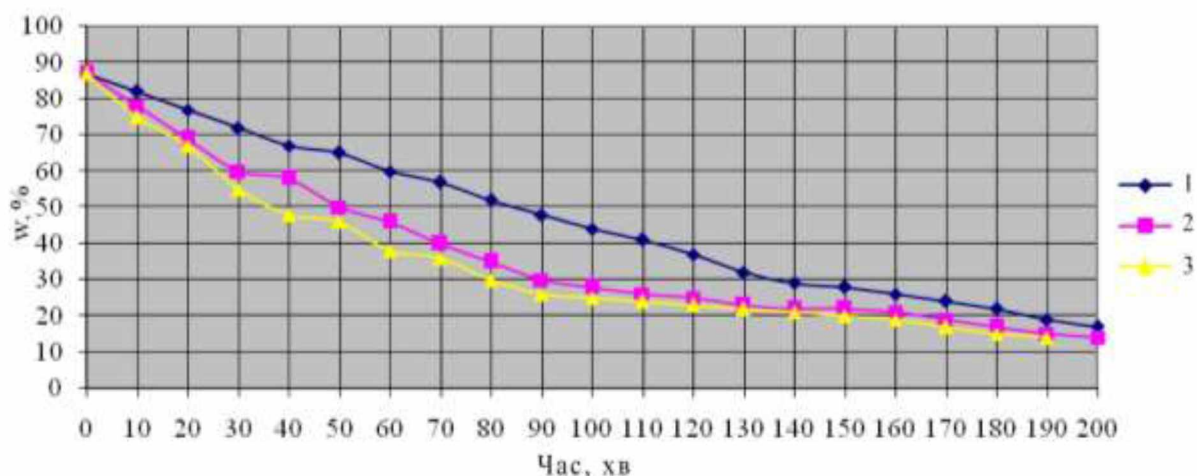


Рисунок 3.8 – Криві нагріву з слюдопластовим нагрівачем

Аналіз відображених кривих вказує на те, що для досягнення вологості 12% найменший час витрачається при застосуванні керамічних імпульсних нагрівачів. Результати досліджень по визначенню впливу параметрів ІЧ-енергопідводу на

температуру коренеплодів представлені в таблиці 3.3. За допомогою планування експериментів проведена оцінка залежності температури нагрівання коренеплодів від параметрів ІЧ-енергопідводу представлена поверхнями відгуку рисунку 4.9.

Таблиця 3.3 - Вплив потужності ІЧ-випромінювачів на температуру нагрівання коренеплодів

Номер досліджу	Потужність	Час	Відстань	Температура коренеплодів
	Вт	сек	мм	°C
1	600	58	148	63
2	600	58	198	44
3	600	58	248	37
4	600	328	148	94
5	600	328	198	66
6	600	328	248	52
7	600	598	148	97
8	600	598	198	68
9	600	598	248	54
10	1000	58	148	109
11	1000	58	198	97
12	1000	58	248	78
13	1000	328	148	146
14	1000	328	198	124
15	1000	328	248	105
16	1000	598	148	146
17	1000	598	198	123
18	1000	598	248	105
19	1400	58	148	140
20	1400	58	198	72
21	1400	58	248	69
22	1400	328	148	178
23	1400	328	198	112
24	1400	328	248	106
25	1400	598	148	178
26	1400	598	198	128
27	1400	598	248	108

Аналіз представлених даних показав, що температура коренеплодів не перевищує 60°C при опроміненні їх середньохвильовим випромінювачем потужністю 500 Вт на робочій відстані 250 мм під час повного циклу роботи опромінювача 10 хв.

Оскільки перевищення заданої температури коренеплодів при сушінні призводить до незворотних втрат вітамінів і мікроелементів, то дані параметри ІЧ-енергопідводу можна прийняти як «ефективні».

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що температура нагріву коренеплодів (рис.3.9) безпосередньо залежить від параметрів ІЧ-енергопідводу. Розглянуто вплив трьох чинників: потужності випромінювача (600 Вт (-1), 1000 Вт (0) і 1400 Вт (+1)); часу нагріву (58 сек (-1), 328 (0) і 598 сек (+1)); відстані між випромінювачем і коренеплодами (148 мм (-1), 198 мм (0) і 248 мм (+1)). Отримано рівняння регресії:

$$y_1 = 118.75 + 28.66x_{1м} + 16,57x_{2н} - 24,29x_3 - 22,21x_{1м}^2 - 13,89x_{2н}^2 + 10,93x_3^2 - 8,5x_{1м}x_3,$$

де $x_{1м}$ – потужність випромінювача, Вт;

$x_{2н}$ – час нагріву, сек;

x_3 – відстань між випромінювачем та коренеплодами, мм;

y_1 – температура нагріву коренеплодів, С.

Як і слід було очікувати, поверхні відгуку нагріву коренеплодів, наведені на рисунку 3.9, є експоненціальні залежності. Експонентний характер нагріву коренеплодів в процесі опромінення його потужним потоком ІЧ-випромінювання вказує на чіткий вплив показника концентрації потужності на швидкість нагріву продукту.

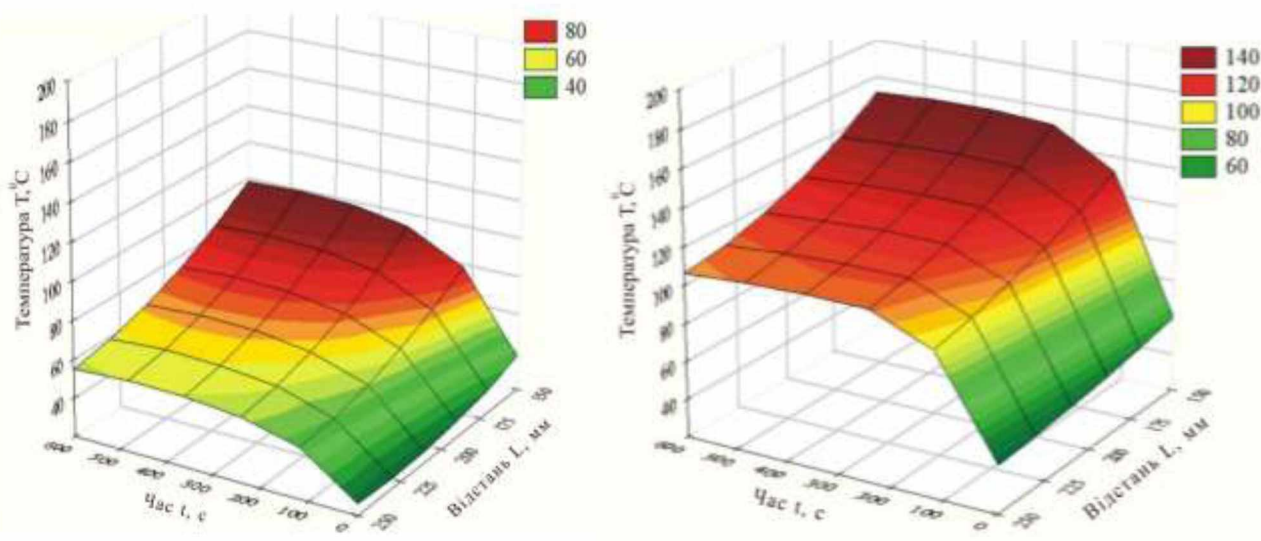
В якості головного якісного параметра біотехнічних умов нагрівання при отриманні продуктів високої біологічної активності прийнята температура коренеплодів, яка не повинна перевищувати 60 °С.

Протягом повного циклу опромінення - 598 секунд, що на відстані 225-248 мм при потужності випромінювача 400 Вт, температура нагріву коренеплодів не перевищує 60°С. Мінімальна температура нагріву коренеплодів (39°С) спостерігається при параметрах ІЧ-енергопідводу: 400 Вт, 58 сек і 248 мм. Максимальна температура нагріву коренеплодів (180 ° С) спостерігається при наступних параметрах ІЧ-енергопідводу 1400 Вт, 328-598 сек і 148 мм.

Перевірка гіпотези про адекватність отриманих рівнянь здійснювалась за допомогою критерію Фішера (2.8):

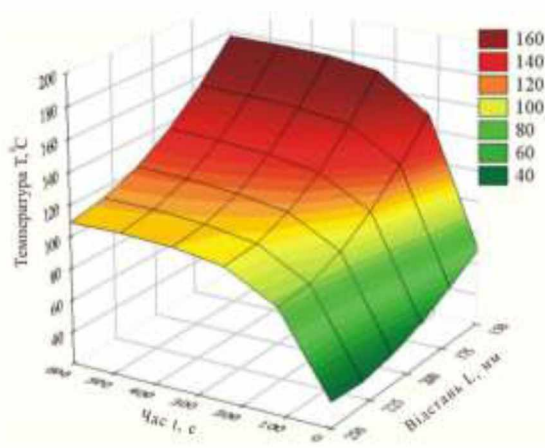
$$F = 0,48 \leq 3,8.$$

Гіпотеза не відкидається, рівняння регресії визнається адекватним.



а)

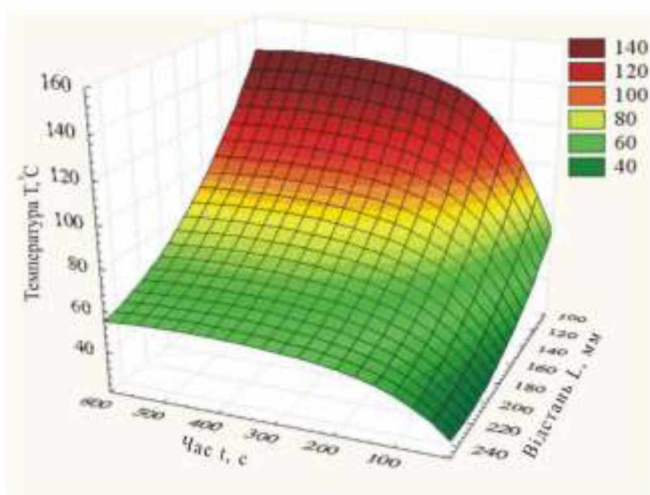
б)



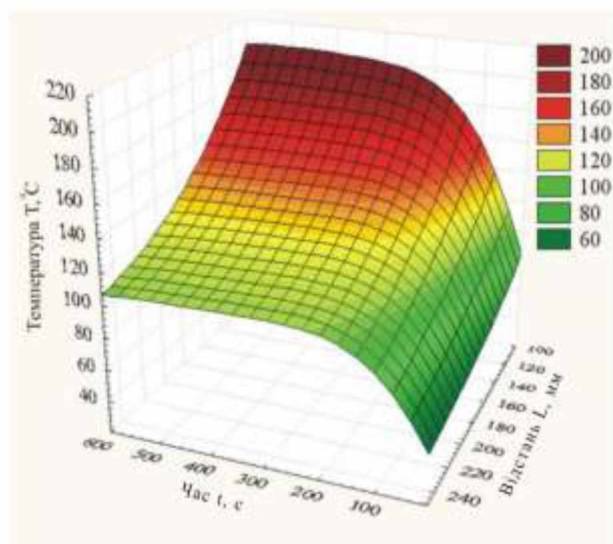
в)

Рисунок 3.9 - Залежність температури нагріву коренеплідів від параметрів ІЧ-енергопідводу: а - потужність випромінювача 400 Вт; б - потужність випромінювача 1000 Вт; в - потужність випромінювача 1400 Вт

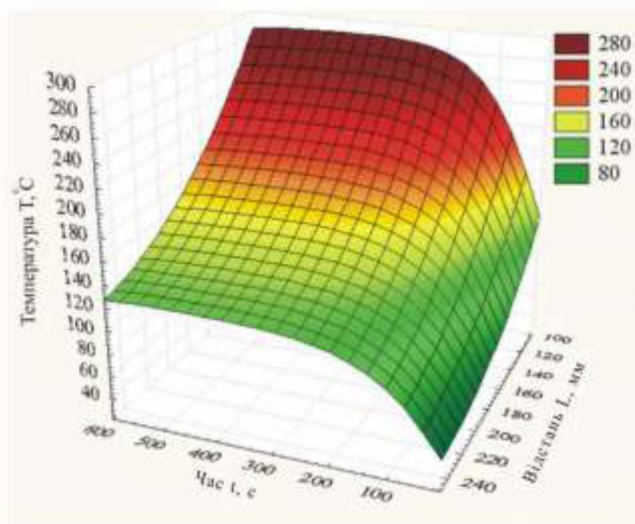
На рисунках 3.10, 3.11 представлені поверхні відгуку нагріву коренеплідів, отримані експериментальним шляхом для середньохвильових і короткохвильових імпульсних керамічних перетворювачів випромінювання. Аналіз поверхонь відгуку підтверджує, що зазначені вище технологічні параметри температури коренеклубнеплодів і швидкості їх нагрівання залежать від відстані між випромінювачем і поверхнею матеріалу і часом обробки.



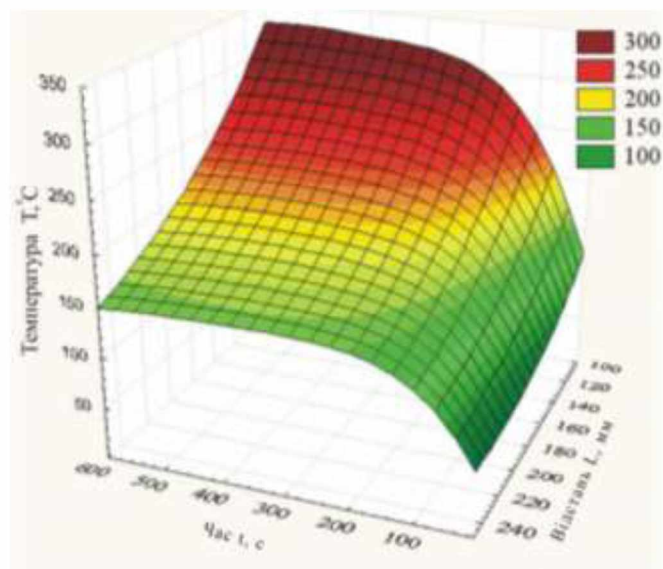
а)



б)

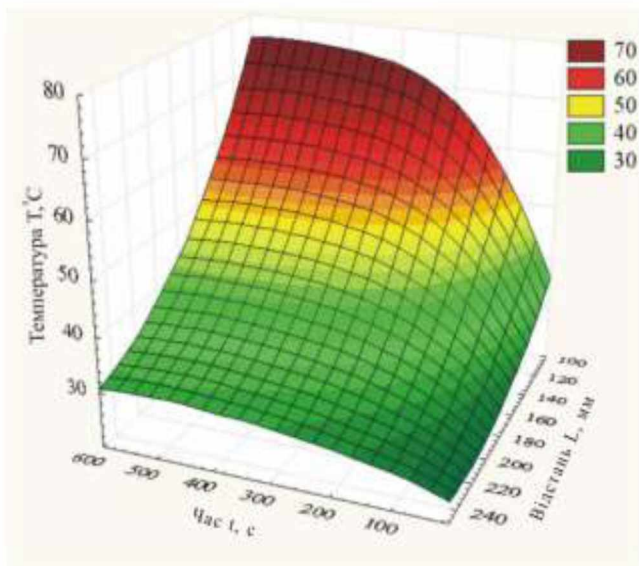


в)

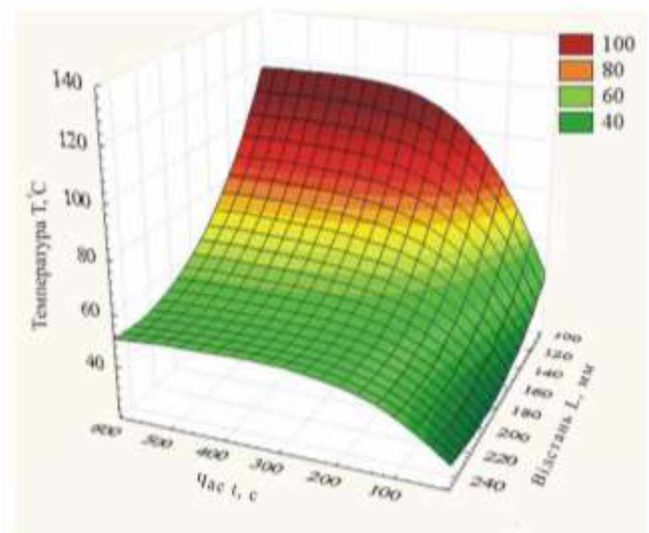


г)

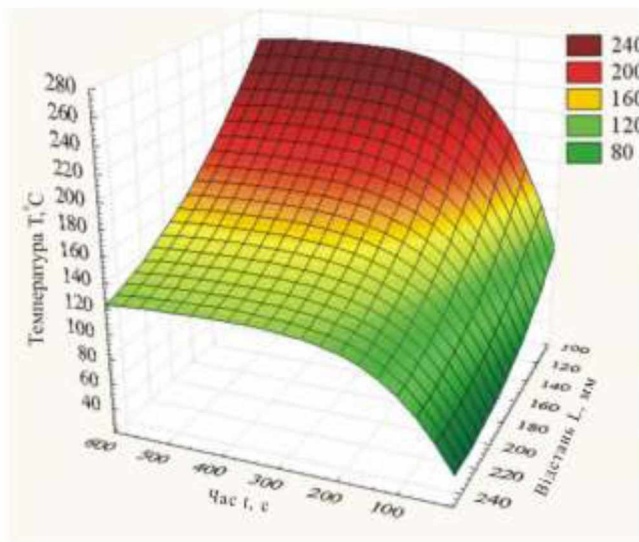
Рисунок 3.10 – Поверхні відгуку на нагріві коренеплодів при опроміненні середньохвильовим випромінювачем а) $T_{\text{випр}}=600\text{С}$, $P=700\text{ Вт}$; б) $T_{\text{випр}}=700\text{С}$, $P=1060\text{ Вт}$; в) $T_{\text{випр}}=1000\text{С}$, $P=2000\text{ Вт}$; г) $T_{\text{випр}}=1060\text{С}$, $P=2250\text{ Вт}$.



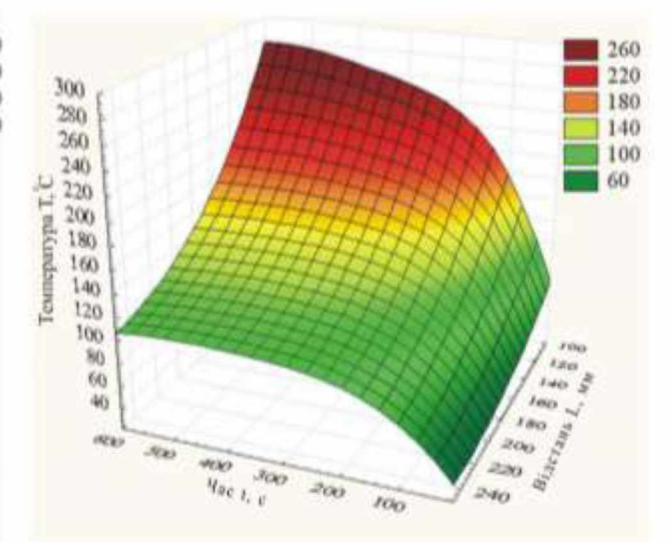
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 – Поверхні відгуку на нагріві коренеплодів при опроміненні короткохвильовим випромінювачем а) $T_{\text{випр}}=1260\text{C}$, $P=220\text{ Вт}$; б) $T_{\text{випр}}=1450$, $P=420\text{ Вт}$; в) $T_{\text{випр}}=2000\text{C}$, $P=1520\text{ Вт}$; г) $T_{\text{випр}}=2100\text{C}$, $P=1800\text{ Вт}$.

Для надання кількісної ознаки процесу нагрівання коренеплодів визначимо максимально допустиму температуру та граничну швидкість нагріву.

Максимально допустиме перевищення температури визначається з виразу [3]

$$\theta_{\text{max}} = \xi \cdot \frac{P}{F}. \quad (3.1)$$

де $\xi = \frac{A_\lambda \cdot \eta}{\alpha_m}$ - коефіцієнт, що враховує властивості випромінювача та

коренеплодів.

Максимальна можлива швидкість нагріву:

$$v_{\max} = \xi \cdot \frac{1}{T_n} \cdot \frac{P}{F}. \quad (3.2)$$

За рівняннями (3.1)-(3.2) були проведені розрахунки відповідних параметрів, результати відображені в таблицях 3.4-3.6.

Таблиця 3.4 - Швидкість нагріву коренеплодів $v_{\text{п}}$, °C/с, при температурі нагріву $t_{\text{н}} = 40^\circ\text{C}$

Вміст вологи, %	Швидкість нагріву $v_{\text{п}}$, °C/с		
	Морква	Топінамбур	Буряк
10	0,713-0,152	0,543-0,121	0,761-0,212
20	0,654-0,143	0,493-0,112	0,652-0,182
30	0,586-0,124	0,442-0,103	0,573-0,153
40	0,542-0,111	0,411-0,094	0,514-0,134
50	0,482-0,102	0,382-0,085	0,465-0,125
60	0,443-0,093	0,353-0,086	0,416-0,116
70	0,404-0,084	0,324-0,077	0,387-0,107
80	0,335-0,075	0,301-0,077	0,358-0,098

Таблиця 3.5 - Швидкість нагріву коренеплодів $v_{\text{п}}$, °C/с, при температурі нагріву $t_{\text{н}} = 50^\circ\text{C}$

Вміст вологи, %	Швидкість нагріву $v_{\text{п}}$, °C/с		
	Морква	Топінамбур	Буряк
10	0,802-0,172	0,613-0,142	0,863-0,233
20	0,732-0,163	0,553-0,123	0,734-0,202
30	0,663-0,144	0,504-0,114	0,652-0,171
40	0,604-0,131	0,465-0,105	0,571-0,152
50	0,585-0,112	0,426-0,091	0,522-0,144
60	0,506-0,103	0,391-0,092	0,463-0,123
70	0,451-0,094	0,361-0,083	0,434-0,112
80	0,382-0,822	0,342-0,084	0,395-0,103

Таблиця 3.6 - Швидкість нагріву коренеплодів $v_{\text{п}}$, °C/с, при температурі нагріву $t_{\text{н}} = 50^{\circ}\text{C}$

Вміст вологи, %	Швидкість нагріву $v_{\text{п}}$, °C/с		
	Морква	Топінамбур	Буряк
10	1,072-0,225	0,813-0,185	1,155-0,314
20	0,982-0,214	0,744-0,174	0,984-0,273
30	0,882-0,193	0,675-0,152	0,863-0,262
40	0,811-0,175	0,613-0,143	0,762-0,201
50	0,733-0,153	0,574-0,134	0,691-0,184
60	0,674-0,144	0,522-0,125	0,622-0,175
70	0,615-0,135	0,493-0,112	0,575-0,156
80	0,506-0,102	0,464-0,104	0,536-0,147

Отримані результати розрахунків дають змогу чітко окреслювати граничні параметри температурного стану коренеплодів та швидкості їх прогріву при інфрачервоному сушінні.

3.3 Дослідження температурного поля випромінювачів

Для більш повного уявлення про характер впливу інфрачервоного випромінювання на об'єкт сушіння, необхідно мати уявлення про рівномірність розподілу енергетичного потоку випромінювання на поверхні об'єкту впливу. Основна вимога полягає в тому, що випромінювач повинен створити, можливо, більшу рівномірність випромінюваного потоку на всій поверхні коренеплодів. Однак в даний час жоден з існуючих випромінювачів не може забезпечити цієї вимоги для даної конструкції сушарки. Кожен випромінювач, має характерний для нього полем випромінювання, інтенсивність якого має найбільше значення в середній частині, по осі симетрії випромінювача, і зменшується в будь-яку сторону від осі симетрії.

Як видно з розташування поверхонь відгуку (рис. 3.12), на відстані 250 мм від випромінювача, в середині поля, температура становить 60°C , при цьому вліво і вправо від осі симетрії відбувається значне зниження температури. Подібне температурне поле куполоподібного виду діє на коренеплоди, якщо воно опромінюється одним випромінювачем. Щоб оцінити вплив відстані від випромінювача до поверхні нагрівання, були визначені для різних випромінювачів

криві теплового поля на різних відстанях. Аналіз отриманих даних підтверджує, що для отримання рівномірного температурного поля доцільно застосовувати кілька імпульсних керамічних ІЧ-випромінювачів. Отримано рівняння регресії, яке описує температурне поле на поверхні коренеплодів від випромінювача ESC

$$t = 54.77 + 0.91b - 0.76b^2 - 0.38a^2,$$

де t – температура на опроміненій поверхні, С;

b – ширина випромінювача, мм;

a – довжина випромінювача, мм.

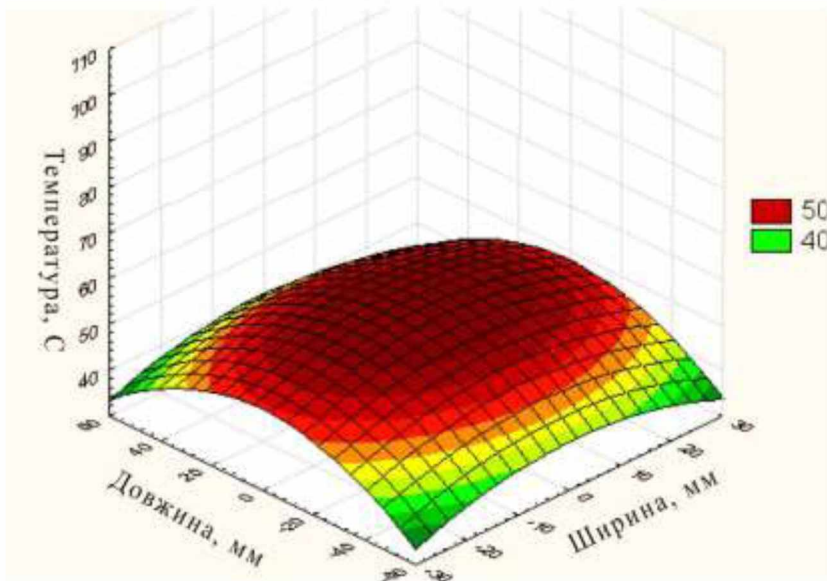


Рисунок 3.12 - Температурне поле випромінювача ESC, потужністю 500 Вт на відстані 250 мм від опромінюваної поверхні.

Для отримання рівномірного температурного поля на касетах з сировиною необхідно використовувати групу випромінювачів (рис. 4.16).

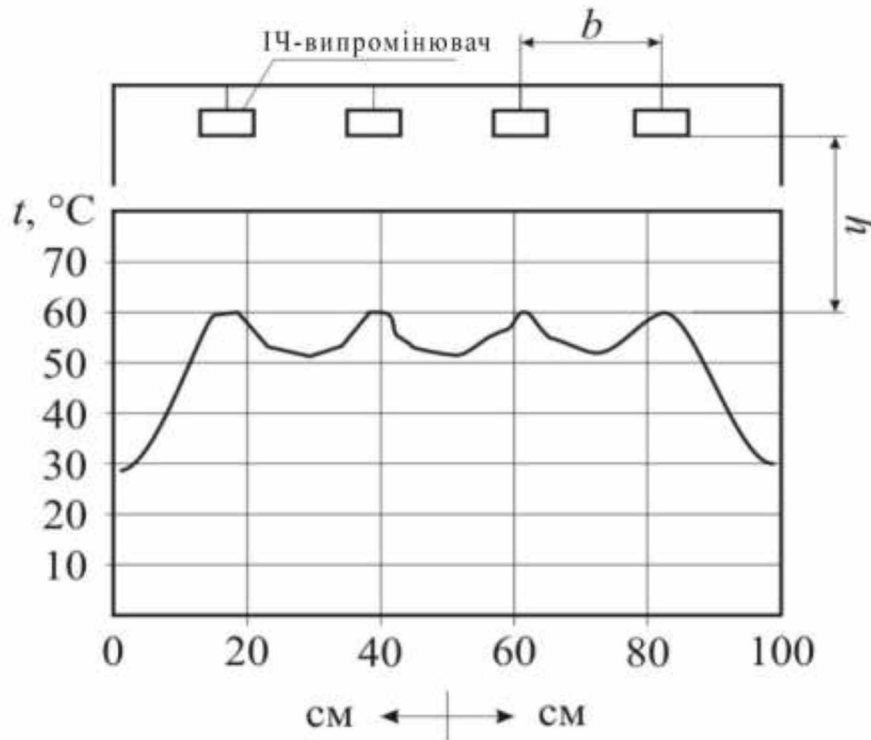


Рисунок 3.13 - Спільна дія випромінювачів на відстані 250 мм від опромінюваної поверхні

У зв'язку з одиничними розмірами випромінювача виведений алгоритм технологічних і конструкційних параметрів для отримання рівномірного температурного поля випромінювання групою випромінювачів: відстань від основи випромінювача до матеріалу повинна бути в 1,2 рази більше осрової відстані між поряд розташованими випромінювачами - $h = 1,1b$.

Використання групи ІЧ-випромінювачів дозволяє більш рівномірно розподілити потік інфрачервоного випромінювання по поверхні нагрівання. При спільній дії групи випромінювачів, в результаті розташування окремих кривих розподілу енергії, виходить рівномірне температурне поле. Це дає можливість зробити висновок про те, що комбінована дія випромінювачів на коренеплоди створює таку потужність опромінення, котра в півтора рази перевершує найбільший ефект, створюваний одним випромінювачем.

При використанні одного або групи різнорідно працюючих випромінювачей неминуче спостерігається явище «крайового ефекту», причина якого полягає в тому, що край сумарного поля створюється в основному за рахунок дії полів тільки одиночних нагрівачів, тоді як в середині сумарне поле створюється за рахунок дії

суміжних полів. Зменшення енергії освітленості, а, отже, і температури по краях касети призводить до нерівномірності видалення вмісту вологи по ширині касети, зниження якості термообробки коренеплодів. Крайовий ефект можна знизити ефективним управлінням потужністю ІЧ-випромінювачів. У процесі регулювання потужності нагрівачів за допомогою тиристорного регулятора, усунення крайових ефектів здійснюється розміщенням регульованих випромінювачів по ширині ІЧ-генератора. Розміщуючи більш потужні нагрівачі по краях ІЧ-генератора, можна добитися однакового потоку випромінювання по всій ширині генератора [3].

При проведенні експериментальних досліджень були отримані температури нагріву випромінювачів ECS-2 при сушінні коренеклубнеплодів в циклах з пониженням ІЧ-енергопідводу, з постійним ІЧ-енергопідводом і з підвищенням ІЧ-енергопідводу. Дослідження проводилися з елементом штучної конвекції і без нього.

Результати даних досліджень відображені на рисунку 3.14.

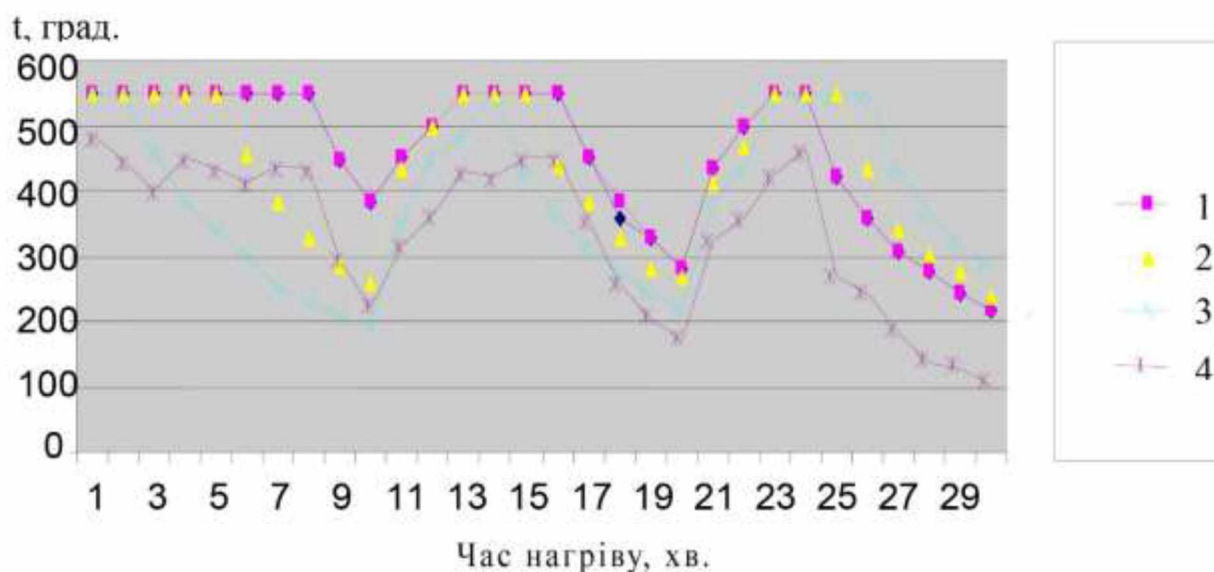


Рисунок 3.14 - Температура випромінювача при різних циклах ІЧ-енергопідводу: 1 - зі зниженням рівня енергопідводу, 2 - в повторно-короткочасному режимі, 3 - з підвищенням рівня енергопідводу, 4 - з елементом штучної конвекції

Аналіз даних на рисунку 3.14 відображають, що робоча температура випромінювача, працюючого без штучної конвекції, змінюється відрізками експоненційних кривих, повільно збільшуючись до граничної, і незначно знижується в момент відключення випромінювача. При введенні штучної конвекції температура

випромінювача знижується значно сильніше і при включенні випромінювача, і при відключенні його. Крім того, були проведені експерименти по визначенню температури на поверхні коренеплодах в різних режимах енергопідводу з елементом штучної конвекції і без останнього. Результати вимірювань наведені на рисунку 3.15.

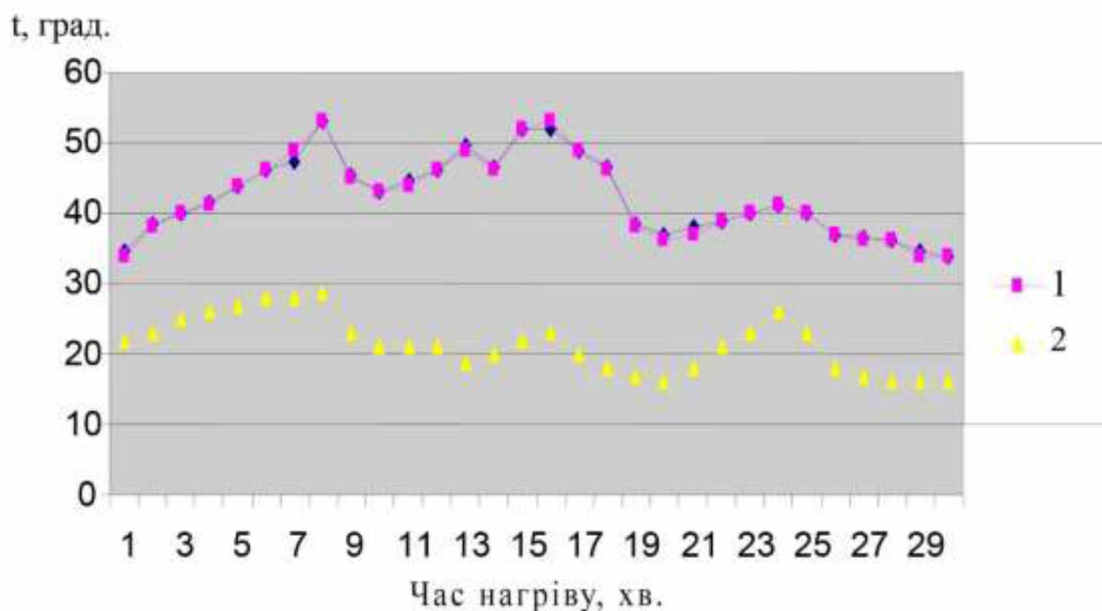


Рисунок 3.15 - Температура коренеплодів з елементом штучної конвекції: 1 - без елемента штучної конвекції, 2 - з елементом штучної конвекції

Процес нагріву коренеплодів, нарізаного соломкою розміру $3 \times 3 \times 10$ мм розкладеного на лотках шаром 1,5-2 см, здійснювався імпульсним керамічним нагрівачем потужністю 500 Вт на відстані 200 мм. Аналіз отриманих даних показує, що постійне використання штучної конвекції знижує температуру випромінювача і коренеплодів. У режимі з постійною конвекцією процес сушіння збільшується майже вдвічі, а це впливає негативно на якісні показники кінцевого продукту і збільшує енерговитрати. Отже найбільш ефективним є проведення процесу сушіння з періодичним дією елемента штучної конвекції в період паузи для видалення вологи або при досягненні продуктом граничної температури. Застосування методу сушки з пониженням рівня ПЧ-енергопідводу найбільш точно відповідає технологічних вимогам по підтримці гранично допустимої температури.

3.4 Висновки до третього розділу

1. Проникність коренеплодів при опроміненні короткохвильовим ІЧ-випромінюванням при товщині шару 5 мм в 1,5 рази вище, ніж при опроміненні середньохвильовим ІЧ-випромінювачем, однак, при збільшенні товщини шару дана відмінність згладжується.

2. Температурні поля на поверхні коренеплодів від імпульсної ІЧ-випромінювачів носять куполоподібний характер і описується законом розподілу Гауса.

3. Виведений алгоритм технологічних і конструкційних параметрів для отримання рівномірного температурного поля випромінювання груп випромінювачів: відстань від основи випромінювача до матеріалу повинна бути в 1,2 рази більше осьової відстані між поряд розташованими випромінювачами - $h = 1,1b$.

4. Оптимальна відстань від ІЧ-випромінювача потужністю 500 Вт до опромінюваної поверхні коренеплоди становить 225-250 мм; при цьому відстані температура нагріву не перевищує 60°C протягом одного повного циклу імпульсного перериваного опромінення.

5. Для процесів сушіння коренеплодів в області спектра від 2,8 до 3,3 мкм, спостерігається інтенсивне поглинання енергії інфрачервоного випромінювання, в зв'язку з чим можна констатувати, що практичне значення для сушки коренеплодів можуть мати середньохвильові імпульсні джерела ІЧ випромінювання, що нагріваються до температури не вище 600°C і мають інтегральний коефіцієнт випромінювання вище 0,8.

6. Ефективні режими управління імпульсної інфрачервоною сушкою коренеплодів дозволяють скоротити час процесу вологовідлення 15-21%, знизити енергозатрати процесу сушіння коренеплодів на 15,6%, в порівнянні з ніхромового випромінювачами, які працюють в перервному режимі.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Екологічна експертиза

Екологічність тієї чи іншої технології, технічного обладнання чи технологічного процесу визначається через відхилення поточних рівнів викидів, що супроводжується при їх практичному впровадженню, від нормованих чи гранично-допустимих викидів в атмосферне повітря чи забруднюючих стоків в гідросферу. Крім цього, об'єкти екологічного аналізу, зокрема технічні системи, не повинні призводити до появи надмірного шумового ефекту, вібрації, концентрації високоенергетичного електромагнітних полів, тощо, гранично допустимі норми яких доволі чітко регламентуються в житлових зонах або в області тимчасового скупченості людей. Досягнення нормованих показників різних видів викидів є головною запорукою екологічності різних за своєю технічною складністю та практичної реалізацією проектів промислово-виробничих та житлових об'єктів.

Екологічна експертиза можна розділити на два основних категорії – суспільна та державна. Державна експертиза передбачає перевірку наявної документації щодо проектного або вже існуючого виробничого об'єкту на предмет відповідність екологічним нормам та правилам. І проводиться вона спеціальними експертними структурами органів державного управління в області природоохоронної діяльності та природокористування на рівні загальнодержавному або регіонального значення.

На відмінну від державної громадська експертиза здійснюється громадськими спільнотами, діяльність яких спрямована на охорону навколишнього природного середовища, зокрема і на здійснення екологічної експертизи

Ключовою метою екологічної експертизи полягає у визначенні рівня достатності техніко-організаційних заходів щодо дотримання необхідного рівня екологічної безпеки різних технічних систем, технологій, технічного обладнання та устаткування, виробничо-технологічного процесу у відповідності до природоохоронних нормативів та правил.

До об'єктів екологічної експертизи відносять також проекти технічної документації на новостворене технологічне обладнання та устаткування, нову

технологію та сертифіковані послуги та товари, які включені до списку, що затверджується уповноваженими на це державними органами у галузі екологічної експертизи та окресленні в ключових нормативно-правових документах – закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», прийнятого 25 червня 1991 року, та «Про екологічну експертизу» від 9 лютого 1995 [13,14].

Головною метою експертних оцінок або інженерно-екологічної експертизи – багатогранна оцінка впливу об'єктів експертизи на природне середовище, зокрема як на етапі затвердження проекту, роботи виробничого об'єкту, так і при його модернізації, надання висновків та продукування рішень для ухвалення або відхилення проектів, можливості подальшого функціонування виробничого об'єкту, окреслення допустимих меж збільшення існуючого виробництва, рішень з приводу ліквідації та примусу до установки екологічно безпечного обладнання або застосування нових природоохоронних заходів.

Здійснення інженерно-екологічної експертизи дозволяє окреслити можливі екологічні наслідки будівництва, функціонування та збільшення підприємства у співставленні з допустимим станом природного середовища. Виробниче підприємство не повинно допускати завдання шкоди природному та навколишньому середовищу людини, не призводити до ускладнення функціонування оточуючих виробничих об'єктів та порушувати протікання їх технологічних процесів.

Предметом розгляду впливу на оточуюче навколишнє середовище є технологія механічного подрібнення кормів в молотковій дробарці.

Дана технологія за своєю потенційною загрозою для навколишнього середовища відноситься до найбільш безпечніших та екологічно чистих видів виробничої діяльності. Це обумовлено мінімально низькою кількістю викидів забруднюючих речовин, що утворюються внаслідок реалізації технологічного подрібнення зерна.

Основним джерелом забруднення для даної технології є викиди в атмосферу зважених гігроскопічних частинок або пилу, які спрямовуються в повітряний басейн з аспіраційних очищувальних систем та систем вентиляції повітря з виробничих приміщень. Відповідно до прийнятих на законодавчому рівні гранично допустимих

концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі кількість зважених частинок повинна коливатися в межах 0,05...0,5 мг/дм³. [39]

Для запобігання перевищення рівня концентрації пилу в повітрі необхідно постійно проводити контроль за технічним станом вентиляційного обладнання, періодично проводити моніторинг якості повітря, запровадити систему пиловідокремлюючих засобів для очищення повітряного потоку.

Негативним наслідком надмірного перевищення концентрацій пилу в повітрі є можливість виникнення вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій на виробництві.

До заходів щодо запобігання та локалізації пилових вибухів відносяться [39]:

- суворе дотримання технологічної дисципліни, правил, положень та виробничих інструкцій;
- підтримання технологічного, електротехнічного, транспортного і допоміжного устаткування в технічно справному стані;
- зберігання сировини в тих складах та бункерах, які для цього призначені;
- герметизація обладнання і комунікацій;
- ефективна робота аспіраційних мереж;
- систематичне прибирання пилу з підлоги, стін, обладнання, будівельних конструкцій;
- найсуворіше виконання правил ведення робіт з відкритим вогнем, у тому числі зварювальних;
- неухильне дотримання режиму куріння (тільки у відведених місцях);
- захист від статичної електрики.

Технологічна лінія характеризується наявністю великої кількості виробничого обладнання, яке є джерелом надмірного шуму та вібрацій. Для зниження рівня шуму до санітарно-гігієнічних норм передбачаємо використання спеціальних шумо- та вібраційнопоглинальних подушок, що встановлюємо під технологічне обладнання, а також застосування операторами індивідуальних засобів захисту - протишумних навушників.

У кінцевому випадку, технологія подрібнення зерна характеризується мінімальним рівнем екологічної загрози, не призводить до негативного впливу на

стан природного навколишнього середовища, є безпечним для людини та живих організмів та відповідає всім екологічним нормам та правилам, обумовлених чиним вітчизняним екологічним законодавством.

4.2 Охорона праці

4.2.1 Актуальність проблеми охорони праці у виробничому середовищі

Одним із пріоритетним напрямком соціальної програми розвитку країни є охорона життя та здоров'я населення. Існує цілий збірник законів та нормативно-правових актів, що закріплюють на державному рівні даний напрямок. Зокрема можна виділити Конституцію України, закон України «Про охорону праці», зведений кодекс законів про працю, ЗУ «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання які спричинили втрату працездатності» [11].

На підставі статичних даних Фонду соціального страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань рівень травматизму на виробництві та професійних захворювань в Україні свідчить про високий якість організації охорони праці. Впродовж останніх п'яти років кількість нещасних випадків, що зв'язані з виробничим процесом, скоротилася на 60%, а число нещасних випадків з летальними наслідками – на 45% [16].

За думкою експертів соціального фонду страхування наголошують на тому, що значна кількість нещасних випадків відбувається через невиконання правил з охорони праці та посадових обов'язків.

У грошовому еквіваленті втрати України у сфері охорони праці знаходяться в межах 60 млрд гривень [16].

Проблематика виробничого травматизму та захворюваностей на професійній основі акцентує на системні порушення підприємств щодо не дотримання охорони праці та гігієни праці. Керівники підприємства доволі часто нехтують заходами щодо організації нормальних умов праці і профілактики профзахворювань. Тому

робітники, перебуваючи в такій ситуації, щоразу наражаються на ймовірність отримати різноманітні травми та каліцтва різної ступеня важкості.

Проведення узгодження нормативних актів України у сфері охорони праці з відповідними нормами та правилами Європейського Союзу є прогресивним напрямком в поліпшенні стану охорони праці та зменшення рівня травматизму, а також сприятиме гармонізації трудового законодавства держави. Це в кінцевому залишку наблизить виробників до адекватної поведінки в організації безпечних умов праці.

Згідно чинного законодавства кожне підприємство має виділяти на потреби дотримання нормальних умов праці 0,5% коштів від фонду заробітної плати, що є одним із головних факторів зменшення рівня виробничого травматизму та кількості нещасних випадків [16].

Тісне переплетення та зближення трудового законодавства європейської спільноти та України дозволить повноцінно імплементувати сучасні міжнародні стандарти ISO 9000 та ISO 14000, а також організацію системи охорони та безпеки праці згідно стандарту OHSAS 18001:2007.

За даними експертів з охорони праці повноцінне введення в систему охорони підприємств виробничих підприємств міжнародних стандартів щорічно відслідковується різке зменшення рівня травматизму та профзахворюваності. При цьому умови праці в повній мірі відповідають європейським нормам та правилам.

Ще одним важливим аспектом – це юридичне оформлення трудових відносин між роботодавцем та робітником з отриманням офіційної зарплати, що гарантує державний захист громадян від необґрунтованого звільнення, але й забезпечить повноцінну безпеку та нормальні умови праці.

Отож, для створення нормальних та безпечних умов праці в кожному виробничому підрозділі, робочому місці власник підприємства або виробничого об'єкту повинен створити систему управління охорони праці та гарантувати повноцінне її функціонування. При цьому на підприємстві з кількістю працівників більше 50 власник повинен службу з охорони праці за типовим проектом, з послідувачим затвердженням у відповідному уповноваженому органі центрального

органу виконавчої влади з питань охорони праці. При кількості працівників менше від 50 достатньо залучати фахівців, що мають відповідний фах та знання з охорони праці. Для підприємств з чисельністю менше 20 осіб можуть залучатися фахівці на консультативних засадах [16].

4.2.2 Організація безпечного виконання робіт відповідно до правил на всіх етапах трудових, виробничих і технологічних процесів

При реалізації технологічного процесу механічне подрібнення зернової маси в умовах виробництва комбікормів можуть виникати небезпечні і шкідливі фактори, зокрема [6]:

- підвищена запиленість повітряного середовища робочої зони;
- рухомі механізми приводів;
- висока напруга електричного поля і статичної електрики;
- можливість виникнення вибуху або пожежі.

При підвищеній запиленості повітря і наявності відкритого вогню або інших джерел підвищеної температури (нагрівання підшипників, іскріння) в приміщенні можливий вибух пилоповітряної суміші або виникнення загорання мілкодисперсних частинок.

З метою недопущення появи небезпечних чи аварійних ситуацій необхідно здійснити організацію безпечного виконання робіт, спланувавши заходи щодо пожежної безпеки, виробничої санітарії, ергономіки, технічної естетики.

До заходів виробничої санітарії слід віднести наступні [6]:

- для уникнення надлишкового рівня забруднення повітря пиловими частками слід провести герметизацію технологічних поєднань між технологічним обладнанням та шляхопроводами, що їх об'єднують. А також відслідковувати технічний стан системи аспірації технологічного обладнання та вентиляції робочої зони;
- для нормалізації вологісно-температурного стану повітря в робочій зоні слід передбачати використання дворежимного кліматичного обладнання для здійснення обігріву в холодну пору та охолодження в теплий період, також слід передбачити застосування технічних засобів з регулювання рівня вологості;

– для нормалізації рівня освітленості в побутових та виробничих приміщень потрібно належним чином спланувати рівномірно розташувати освітлювальні пристрої з енергоефективними світловипромінюючими засобами;

– для недопущення перевищення рівнів шумових, ультразвукових, вібраційних проявів слід застосовувати шумопоглинальні засоби та захисні екрани на потенційних генераторах акустичних випромінювань;

– передбачити своєчасну та періодичну заміну засобів індивідуального захисту.

З метою дотримання правил поведінки з технологічним обладнанням необхідно дотримуватися наступних заходів.

Виробниче обладнання повинно бути забезпечено від накопичення електростатичних зарядів в небезпечних кількостях, що передбачає необхідність підключення їх до заземлюючих контурів.

Запобігати випадковому дотику працівниками гарячих областей конструкції технологічного обладнання, що може бути забезпечено застосування теплоізоляційних оболонок. Температура зовнішньої поверхні конструкцій не повинна перевищувати 45°C.

Для уникнення отримання фізичних ушкоджень по причині наявності у технологічному устаткуванні гострих кутів, незачищеної поверхні, задирів та напливів металу необхідно застосування захисних оболонок з заокругленими формами та періодично відслідковувати технічний стан даного обладнання.

У конструкції обладнання повинно бути реалізований захист від невірної чи випадкового увімкнення та вимкнення. Органи керування повинні бути зручні у використанні та доступними для працівників та мати відповідні роз'яснювальні написи з відповідним кольоровим фарбуванням.

Для запобігання травмування робітників від механічно рухомих елементів конструкції обладнання слід передбачити наявність захисних кожухів чи огорожувальних оболонок.

Елементи устаткування, що здійснюють обертовий рух повинні бути відбалансовані як у зібраному стані, так і окремо частинами.

У випадку внесення конструктивних змін до будови технологічного обладнання потрібно вжити заходів по запобіганню саморозгвинчуванню різьбових з'єднань, вертикально розташовані гвинти встановлюють вгору з виступаючою гвинтовою частиною не більше за 2 витка різьби.

Живильні засоби повинні обладнуватися спеціальними пристосуваннями, що запобігають залипанню або зависанню речовин, що завантажуються. У період роботи обладнання категорично забороняється розчищати вручну завали біля рухомих органів.

Технологічне обладнання розміщуються таким чином, щоб його ремонт, технічне обслуговування та монтаж проводився в зручний та безпечний спосіб, поліпшувало задачу підтримання устаткування та приміщень у належному санітарно-гігієнічному стані.

Під час монтажних робіт по встановленню обладнання слід заздалегідь планувати його розташування із забезпеченням вільного простору для проходу.

4.2.3 Розробка комплексу організаційних та технічних заходів з охорони праці та пожежної безпеки

Робітник в процесі реалізації покладених на його професіональних обов'язків повинен :

- знати будову та правила експлуатації обладнання, яке знаходиться під його керуванням та обслуговуванням;
- знати призначення окремих складових одиниць та елементів будови;
- знати технологічний процес теплової обробки зерна під час проведення ГТО;
- здійснювати контроль за режимними параметрами роботи обладнання, аспірації, припливно-витяжної вентиляції, теплоносія, роботу засобів автоматики і блокування;
- правильно використовувати спецодяг та засоби індивідуального захисту;
- знати підходи до надання першої медичної допомоги при виникненні нещасних випадках;
- відповідати за роботу на своїй ділянці.

Обслуговуючий персонал відповідно до прийнятих норм забезпечення спецодягом та засобами індивідуального захисту повинен мати [6]:

- костюм з бавовняного матеріалу з пилонепроникної тканини (ГОСТ 12.4.085-80, ГОСТ 12.4.086-80);
- шоломом бавовняним з пилонепроникної тканини;
- черевиками шкіряними;
- рукавицями бавовняними;
- респіратором;
- в холодну пору року - курткою на утеплювальній прокладці (ГОСТ 12.4.088-80).

Працівник, який обслуговує сушарку, зобов'язаний знати і дотримуватися:

- посадової інструкції;
- правила пожежної безпеки;
- правила особистої гігієни.

Приміщення сушарки, а також устаткування, що знаходиться в цьому приміщенні, повинні міститися в чистоті і постійній справності.

Забороняється зберігання в приміщенні з високим температурним режимом сторонніх предметів, легкозаймистих рідин та предметів, крім мастильних матеріалів, запас яких не повинен бути більшим за добову норму витрати.

Прибирання приміщення сушарки повинна проводитися при її роботі не рідше двох разів на зміну. Зібрані сміття, відходи, пил повинні віддалятися з приміщення у спеціально відведене для них місце.

Для покращення умов виробничої безпеки та недопущення появи небезпечних ситуацій слід передбачити такі заходи з охорони праці:

1. При боротьбі з надмірним пиловиділенням:
 - раціональне поєднання технологічних процесів з мінімальними викидами пилоутворюючих компонентів в повітряне середовище;
 - проведення вологого знепилення робочих зон;
 - підтримання в чистоті приміщень та технологічного обладнання;
 - застосування індивідуальних засобів захисту.

2. Для боротьби з шумовим ефектом:

- використання змащувально-мастильних матеріалів, що таке сприяє зменшенню зносу та збільшення ресурсу роботи;
- організаційно-технічні заходи щодо дотримання системи профілактичного огляду, проведення технічного обслуговування та ремонту обладнання;
- спланувати оптимальне співвідношення періодів роботи та відпочинку.

3. Для запобігання появи нещасних випадків та аварійних ситуацій продовжувати превентивні заходи:

- отримувати консультативні послуги з питань охорони праці;
- отримувати аргументовані роз'яснення щодо правильних підходів до експлуатації технологічного обладнання, що вводиться до роботи та вже встановленого;
- проведення періодичних перевірок рівня знань робітників з правил охорони праці на робочих місцях.

Для поліпшення стану виробничої безпеки та уникнення аварій і нещасних випадків під час здійснення виробничого процесу слід також звертати пильну увагу на внутрішніх організаційних документи виробничого підприємства.

4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Ефективність від впровадження енергозберігаючої технології інфрачервоного сушіння коренеплодів представляється трьома складовими. Перша складова відображає енергозбереження в результаті мінімальних витрат електроенергії в розробленій установці, що реалізує ефективні режими імпульсного інфрачервоного нагріву. Друга складова показує можливість зниження витрат енергії в технології зберігання коренеплодів. Типове рішення першого завдання полягає в обґрунтуванні вибору енергозберігаючої виробничої установки з ІЧ-випромінювачами для переробки коренеплодів і розрахунку економічної ефективності від її впровадження для виробництва продуктів високої біологічної активності. Економічному розрахунку підлягають дві технічно рівноцінні виробничі установки вертикального типу з ІЧ-

випромінювачем, що працюють в різних режимах і призначені для процесу сушіння сільськогосподарської сировини.

Варіант 1. Виробнича установка з ІЧ-випромінювачем на основі ніхрому.

Варіант 2. Виробнича установка з ІЧ- випромінювачем на основі імпульсних керамічних перетворювачів випромінювання.

Користуючись даними кошторисно-фінансового звіту, знаючи оптові ціни на деталі та обладнання, витрати на монтаж установок, визначаємо оптову ціну установки в будь-якому вигляді:

$B_{o1} = 38000$ грн., установка з ІЧ-випромінювачем на основі ніхрому

$B_{o2} = 46200$ грн., установка з ІК- випромінювачем на основі імпульсних керамічних перетворювачів випромінювання.

Умовою вибору установки є мінімум приведених витрат. З урахуванням того, що порівнянню підлягають рівноцінні варіанти, що дозволяють отримати однаковий виробничий ефект, наведені витрати визначаємо [18]:

$$Z_i = K_{vi} \cdot E_n + EB_i \rightarrow \min \quad (4.1)$$

де K_{vi} – капіталовкладення у відповідності до вибраного варіанту, грн;

E_n – нормативний коефіцієнт капіталовкладень;

EB_i – річні експлуатаційні витрати у відповідності до певного варіанту, грн.

Капіталовкладення в установку [18]:

$$K_v = B_o + M_n + H_p + \Pi_n, \quad (4.2)$$

де M_n – витрати на монтаж та наладку, грн;

H_p – накладні витрати, грн;

Π_n – інші прямі витрати, грн.

Визначаємо витрати на монтаж та наладку для першого варіанту [18]:

$$M_{n1} = K_n B_o, \quad (4.3)$$

де K_n – коефіцієнт, що враховує витрати на монтаж та наладку

$$M_{n1} = 0,27 \cdot 38000 = 10260 \text{ грн.}$$

Накладні витрати складають 10...20% від оптової вартості установки [18]:

$$H_p = 0,15 B_o, \quad (4.4)$$

$$H_p = 0,15 \cdot 38000 = 5700 \text{ грн.}$$

Інші прямі витрати у вигляді планових нарахувань складають 8% від суми C_o , H_p , M_n [18]:

$$P_n = 0,08 \cdot (B_o + H_p + M_n), \quad (4.5)$$

$$P_n = 0,08 \cdot (38000 + 5700 + 10260) = 4317 \text{ грн.}$$

Капіталовкладення в установку за першим варіантом:

$$K_{e1} = 38000 + 10260 + 5700 + 4317 = 58277 \text{ грн.}$$

У відповідності до представленої методики розрахунку об'єму капіталовкладень розраховуємо даний показник для другого варіанту.

$$K_{e1} = 70852 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати містять витрати, що пов'язані з використанням обладнання [18]:

$$EB = Z + A + T_{рем} + B_{ee} + ПВ, \quad (4.6)$$

де Z – витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу, грн;

A , $T_{рем}$ – витрати на амортизацію та поточний ремонт, технічне обслуговування, грн;

B_{ee} – вартість електричної енергії, грн;

$ПВ$ – інші прямі витрати, грн.

Амортизаційні відрахування, витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування визначається за кожним варіантом по встановленим нормам відрахувань від капіталовкладень.

Вихідні дані для розрахунку експлуатаційних витрат за кожним варіантом установок з ІЧ-випромінювачем для термообробки приведені у таблиці 4.1.

Амортизаційні відрахування складають 14,2% від капіталовкладень [18]

$$A = 0,142 \cdot K_e. \quad (4.7)$$

У відповідності до запропонованих варіантів амортизаційні відрахування становлять

$$A_1 = 0,142 \cdot 58277 = 8275 \text{ грн.}$$

$$A_1 = 0,142 \cdot 70852 = 10060 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт та обслуговування обладнання складає 18% від капіталовкладень

$$T_{рем1} = 0,18 \cdot 58277 = 10490 \text{ грн.}$$

$$T_{рем1} = 0,18 \cdot 70852 = 12753 \text{ грн.}$$

Вартість електричної енергії:

$$B_{ee} = P \cdot t_{роб} \cdot B \cdot T, \quad (4.8)$$

де P – питома потужність установки, кВт/кг;

$t_{роб}$ – тривалість робочого періоду сушіння одиниці маси продукції, год;

B – вартість електроенергії, грн/кВтгод;

T – загальний обсяг продукції, т.

Визначаємо вартість електричної енергії

$$B_{ee1} = 1,2 \cdot 2,5 \cdot 1,68 \cdot 33,7 = 84,92 \text{ тис.грн.}$$

$$B_{ee1} = 1,0 \cdot 2,5 \cdot 1,68 \cdot 33,7 / 2 = 70,77 \text{ тис.грн.}$$

Вартість електричної енергії за другим варіантом на 17% меншими від першого варіанту.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку експлуатаційних витрат

Показник	Варіант	
	I	II
Вартість установки, грн	38000	46200
Кількість обслуговуючого персоналу, люд	1	1
Річний фонд робочого часу, год	1750	1750
Річна заробітна плата на одного працівника, грн	84000	84000
Річний випуск продукції, т	33,7	33,7
Питома потужність установки, кВт/кг	1,4	1,0

Інші прямі витрати складають 1% від експлуатаційних витрат [18]

$$ПВ = 0,01 \cdot (З + A + T_{рем} + B_{ee}). \quad (4.9)$$

Прямі витрати для кожного варіанту становитиме:

$$PB_1 = 0,01 \cdot (84000 + 8275 + 10490 + 84920) = 1876,85 \text{ грн.}$$

$$PB_2 = 0,01 \cdot (84000 + 10060 + 12753 + 70770) = 1775,83 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати за варіантами:

$$EB = 84000 + 8275 + 10490 + 84920 + 1876,85 = 189561,85 \text{ грн.}$$

$$EB = 84000 + 10060 + 12753 + 70770 + 1775,83 = 179358,83 \text{ грн.}$$

Визначимо приведені витрати за варіантами, використовуючи вираз (4.1):

$$Z_1 = 58277 \cdot 0,15 + 189561,85 = 198303,4 \text{ грн.}$$

$$Z_2 = 70852 \cdot 0,15 + 179358,83 = 189986,63 \text{ грн.}$$

У відповідності до умови, що приведені витрати повинні прямувати до мінімального значення, найбільш економічно вигідним є другий варіант.

Річний економічний ефект від впровадження обладнання інфрачервоної сушки, що працює у ефективному режимі імпульсного випромінювання, становить:

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (4.10)$$

$$E = 198303,4 - 189986,3 = 8317,1 \text{ грн.}$$

Термін окупності капіталовкладень:

$$T = \frac{K_{e2} - K_{e1}}{E}, \quad (4.11)$$

$$T = \frac{70852 - 58277}{8317,1} = 1,5 \text{ років.}$$

Використання обладнання імпульсного інфрачервоного сушіння призводить до зниження витрат електроенергії на 16,6% у порівнянні з ІЧ-установкою з ніхромовою випромінювачем, що працює у короткочасному режимі.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. На основі проведеної екологічної експертизи щодо виявленню ступеня негативного впливу технології інфрачервоного сушіння на стан природного навколишнього середовища не було встановлено фактів можливого радіоактивного, бактеріального, хімічного та інших видів забруднень

2. Основним об'єктом дослідження на предмет виявлення та упередження небезпечних ситуацій та дотримання вимог охорони праці є техніка безпека та правила поведінки при використанні обладнання для інфрачервоної сушки коренеплодів.

3. У ході проведення аналізу наявних потенційних небезпек при використанні обладнання для інфрачервоної сушки коренеплодів були окреслені ймовірні причини виникнення небезпечних ситуацій та випадків. Більшість травмонебезпечних і аварійних ситуацій було піддано аналізу та надано рекомендації по їх недопущенню та профілактики.

4. На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування було встановлено, що при впровадженні запропонованої технології сушіння коренеплодів можна досягти суттєвої річної економічної вигоди – 12476 грн при достатньо незначному терміну окупності капіталовкладень 1,5 років.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Збереження коренеплодів з високими якісними показниками вимагає великих енерговитрат. Одним з перспективних методів збереження коренеплодів і отримання продуктів високої біологічної активності є застосування ефективних режимів імпульсної інфрачервоного сушіння з використанням спеціальних джерел випромінювання дозволяють знижувати час процесу і енерговитрати.

2. Розроблено і виготовлено лабораторну установку з системою управління ІЧ-енергопідводом. Дана установка в комплексі дозволяє реалізувати ефективні режими імпульсного інфрачервоного сушіння.

3. Результати лабораторних досліджень показали, що:

– при опроміненні короткохвильовим ІК-випромінюванням проникність коренеплодів при товщині шару 5 мм в 1,4 рази вище, ніж при опроміненні середньохвильовим ІЧ-випромінюванням, однак, при збільшенні товщини шару дана відмінність згладжується;

– температурні поля на поверхні коренеплодів від імпульсних ІЧ-випромінювачів носять куполоподібний характер і підкоряються закону розподілу Гауса;

– гранично допустима температура нагріву подрібнених коренеплодів (розміром $30 \times 5 \times 5$ мм) становить 60°C , при якій втрати біологічно активних речовин не перевищують 5% від контролю;

– для процесів сушіння коренеплодів в області спектра від 2,8 мкм до 3,3 мкм, спостерігається інтенсивне поглинання енергії інфрачервоного випромінювання, в зв'язку з чим можна констатувати, що практичне значення для сушки коренеплодів можуть мати середньохвильові імпульсні джерела інфрачервоного випромінювання, що нагріваються до температури не вище 600°C і мають інтегральний коефіцієнт випромінювання вище 0,8.

4. На підставі отриманого температурного поля випромінювача встановлений алгоритм технологічних і конструкційних параметрів для рівномірного температурного поля випромінювання групою випромінювачів: відстань від вершини

випромінювача до матеріалу має бути в 1,1 рази більше осьового відстані між сусідніми випромінювачами (відраховував між їх центрами) - $h = 1,1b$.

5. Результати виробничих досліджень дозволили встановити, що імпульсні керамічні перетворювачі випромінювання працюють в режимі зниження рівня енергопідводу з щільністю потужності $0,8 \text{ кВт/м}^2$ і робочою температурою поверхні вивчення 500°C на відстані 225-250 мм, створюють рівномірне температурне поле на поверхні коренеплодів $40-60^\circ\text{C}$ і дозволяють зберегти якісні показники готового продукту; - ефективні режими імпульсної інфрачервоної сушки коренеплодів дозволяють скоротити час процесу вологовиділення на 16-20%, знизити енерговитрати процесу сушіння на 16,6%.

6. На основі проведеного техніко-економічного обґрунтування було встановлено, що при впровадженні запропонованої технології сушіння коренеплодів можна досягти суттєвої річної економічної вигоди – 12476 грн при достатньо незначному терміну окупності капіталовкладень 1,5 років.