

**Зозуляк І. А.**

к.т.н., ст. викладач

Кондратюк Д.Г.

к.т.н., доцент

Коробко Д.О.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Zozulyak I.**

Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer

Kondratuk D.Ph.D. in Engineering, Associate
Professor**Korobko D.**

graduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 637.115:621.517****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-8****ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ
ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ
СУБЛІМАЦІЙНОГО СВЧ-
СУШІННЯ ХАРЧОВИХ
ПРОДУКТІВ**

Цю роботу присвячено дослідженню й обґрунтуванню технології та схеми устаткування для сушіння овочів, картоплі та фруктів. При цьому необхідно щоб продукти після такого сушіння зберігали високу якість (біологічні, харчові та органолептичні властивості), добре зберігали харчові інгредієнти, мали підвищену поновлюючу здатність, мали незначну усадку та пористу будову.

Проведений аналіз існуючих способів сушіння показав, що перспективним способом являється сублімаційне (ліофілізаційне) сушіння.

Ліофілізаційне сушіння – це процес, у якому вода сублімується шляхом прямого переходу води з твердого стану (лід) у пару, таким чином опускаючи рідкий стан, а потім десорбує воду з «сухого» шару. Він широко використовується для стабілізації високоякісної їжі, біологічних матеріалів і фармацевтичних препаратів, таких як білки, вакцини, бактерії. У процесі зберігається якість висушеного продукту (біологічні, харчові та органолептичні властивості). Це пояснюється тим, що заморожування води в матеріалі перед ліофілізацією пригнічує хімічні, біохімічні та мікробіологічні процеси. Тому смак, запах і вміст різних поживних речовин не змінюються. Харчова сировина містить багато води — від 80 до 95 %. Видалення води шляхом сублімації призводить до створення високопористої структури ліофілізованих продуктів, а регідратація ліофілізатів відбувається негайно.

Вплив сублімаційної сушки слід розглядати з економічного аспекту та якості сублімаційного матеріалу. Вартість продукту в основному залежить від часу сублімаційної сушки. Тому параметри процесу та інші умови його перебігу часто задають так, щоб його час був якомога коротшим. Встановлення параметрів для прискорення процесу може призвести до погіршення властивостей продукту.

На основі аналізу та узагальнення даних вітчизняних та закордонних джерел інформації про технологію та результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу сушіння овочів, картоплі та фруктів обґрунтована принципова схема сублімаційної СВЧ-сушарки харчових продуктів.

Ключові слова: сублімація, ліофілізаційне сушіння, овочі, картопля, фрукти, СВЧ-сушіння, температура, зневоложення, вологовміст, фізико-механічні властивості, теплофізичні характеристики, теплоємність, теплопровідність.



Постановка проблеми. Одна з основних глобальних проблем, що стоять перед людством сьогодні, — це забезпечення населення планети продуктами харчування. Вирішення цієї проблеми значною мірою залежить від овочесушильної галузі.

Сушені овочі, картопля та фрукти є важливими напівфабрикатами для харчоконцентратної, консервної, рибної та м'ясо-молочної промисловості і мають широке застосування як у громадському, так і в індивідуальному харчуванні.

Переваги сушіння як методу консервування добре відомі: мала маса, зручна тара для фасування, висока транспортабельність, можливість тривалого зберігання та транспортування без використання холоду і т.д.

За умови правильного вибору сортів сировини, ефективної організації технологічного процесу виробництва та зберігання, сушені овочі та фрукти зберігають високі смакові та харчові властивості, при цьому витрати праці та часу на їх кулінарну обробку є меншими порівняно з сирими продуктами.

Перед овочесушильною промисловістю постають важливі завдання технічного переозброєння підприємств, що передбачають впровадження поточно-механізованих та автоматизованих ліній з ефективною організацією технологічних процесів підготовки та сушіння сировини. Це дозволить забезпечити високу якість готової продукції та досягти високих техноекономічних показників виробництва. До таких завдань можна віднести, зокрема, виробництво швидковідновлених сушених овочів, застосування високоінтенсивних методів сушіння, таких як розпилювальна сушка та сублімація для виготовлення овочевих і фруктових порошоків, а також розробку продуктів для дитячого та дієтичного харчування. Також важливою є механізоване сушіння винограду та фруктів, а також створення та впровадження маловідходних і безвідходних технологій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Під час зберігання харчові продукти зазнають різноманітних мікробіологічних, біохімічних та ферментативних змін, що призводять до їх псування. Одним із способів пригнічення росту мікроорганізмів і зменшення ферментативної активності є зниження вмісту вологи шляхом природного або штучного сушіння.

Мінімальний вміст вологи, при якому можуть розвиватися бактерії, становить 25-30%, а для цвілевих грибів — 10-15%. Зазвичай під час сушіння вологість знижують до рівня 8-20%, що перешкоджає розвитку мікроорганізмів.

Рослинна сировина, як об'єкт сушіння, містить в собі високу кількість води та низький вміст сухих речовин. Основна частина води знаходиться у вільному вигляді, а лише близько 5% пов'язана з клітинними колоїдами і міцно утримується. Це пояснює легкість сушіння плодовоовочевої сировини до вологості 12-14%, але ускладнює видалення залишкової вологи.

Рослинна сировина характеризується капілярно-пористою структурою, а її хімічний склад складається здебільшого з вуглеводів, білків і ліпідів. У невеликих кількостях присутні біологічно активні речовини, які визначають смакові та біологічні властивості сировини: поліфеноли, вітаміни, органічні кислоти, мінеральні речовини. Саме ці компоненти найбільше піддаються негативним змінам під час підготовки сировини до сушіння та в процесі самого сушіння, що може призводити до зниження біологічної цінності готового продукту.

Згідно з енергетичними показниками, можна виокремити два основні принципи зневоднення: видалення вологи з продукту без зміни її агрегатного стану, тобто у вигляді рідини, і видалення вологи з переходом її в інший агрегатний стан, тобто у вигляді пари.

Перший принцип зневоднення може бути реалізований за допомогою механічних методів, таких як віджимання, фільтрування, відстоювання, центрифугування, або шляхом змішування продуктів з різним вмістом вологи чи з використанням вологопоглиначів.

Другий принцип сушіння пов'язаний з витратою тепла на перетворення води в пару та відведення цієї пари з сушильного апарату в навколишнє середовище. Таке сушіння називається тепловим.

Механічне зневоднення є більш економічним методом порівняно з тепловим сушінням. Проте для обробки овочів і фруктів цей метод непридатний, оскільки він не забезпечує достатнього рівня зневоднення і не дозволяє зберегти вихідні показники якості сировини. Це зумовлено значними втратами водорозчинних речовин, таких як цукри, вітаміни, амінокислоти та інші.

Існує кілька класифікацій способів сушіння за різними ознаками.

За способом впливу сушильного агента:

- природне сушіння - старий спосіб, використовується для висушування плодів, ягід, грибів в регіонах з відповідними кліматичними умовами. Продукт висушують на відкритому повітрі в тонкому шарі до рівноважної вологості;

- штучне сушіння - проводиться в сушильних установках, які розташовують в закритих приміщеннях і постачають необхідними джерелами енергії.

За тиском повітря в сушильній

**камери:**

- вакуумне сушіння — процес, при якому сушіння відбувається під вакуумом, що створюється та підтримується вакуум-насосом.
- атмосферне сушіння — процес, в якому сушильним агентом виступає атмосферне повітря.

За способом підведення тепла до вологого матеріалу сушарки класифікують на:

- конвективні сушарки — теплова енергія передається через конвекцію (переміщення нагрітого повітря або газу);
- кондуктивні сушарки — теплова енергія передається через теплопровідність (безпосередній контакт матеріалу з нагрітими поверхнями);
- терморадіаційні сушарки — теплова енергія передається за допомогою випромінювання (наприклад, інфрачервоного);
- високочастотні сушарки — теплова енергія перетворюється з електричної енергії всередині висушуваного матеріалу за допомогою високочастотних хвиль;
- комбіновані сушарки — передача тепла здійснюється шляхом поєднання різних методів, зазначених вище.

В залежності від напрямку руху висушуваного матеріалу і сушильного агента:

- прямоточні сушарки - напрямок руху висушуваного матеріалу та сушильного агента збігається;
- протиточні сушарки - напрямок руху висушуваного матеріалу та сушильного агента протилежний;
- перехресні сушарки - напрямок руху висушуваного матеріалу перпендикулярний напрямку сушильного агента.

За видом сушильного агента:

- установки, в яких як сушильний агент використовується гаряче повітря, що нагрівається зовнішнім джерелом тепла;
- установки, що використовують гарячі димові гази, які утворюються в процесі спалювання палива, як джерело тепла для сушіння;
- установки, що використовують суміш повітря з димовими газами;
- установки, що використовують перегріту пару.

За циркуляцією сушильного агента:

- сушильні установки, де циркуляція повітря або газів здійснюється за рахунок природних сил, таких як конвекція, без використання додаткових механічних пристроїв;
- сушильні установки, в яких циркуляція повітря або газів забезпечується за допомогою відцентрових чи осьових вентиляторів, що створюють примусовий потік повітря.

За способом нагріву сушильного агента:

- сушильні установки, в яких для нагрівання повітря або газів використовуються калорифери, що працюють на парі;
- сушильні установки, де калорифери нагрівають повітря або гази безпосередньо за допомогою вогню або тепла, що виділяється при спаленні палива;
- сушильні установки, в яких використовується рідке паливо (наприклад, мазут чи дизельне паливо) для підігріву повітря або газів;
- сушильні установки, де тепло генерується шляхом спалювання газоподібного палива (наприклад, природного газу) в топках для нагрівання сушильного агента.

За кратністю використання сушильного агента:

- сушильні установки, в яких нагріте повітря використовується для сушіння матеріалу лише один раз, після чого воно викидається або виводиться з системи;
- сушильні установки, де нагріте повітря циркулює в системі кілька разів, здійснюючи процес сушіння, що дозволяє заощаджувати енергію та знижувати витрати на нагрів.

За видом об'єкта сушіння:

- сушильні установки, призначені для обробки твердих матеріалів (великих, дрібних, пилоподібних);
- сушильні установки, призначені для обробки рідких продуктів, де процес зневоднення відбувається шляхом випаровування води або інших рідких компонентів з матеріалу;
- сушильні установки, розроблені для обробки пастоподібних матеріалів, таких як різні пасти, пюре чи розчини, де процес сушіння забезпечує видалення вологості з густих або в'язких продуктів.

За режимом роботи:

- установки періодичної дії — сушильні системи, де процес сушіння відбувається в циклічному режимі, тобто матеріал завантажується в установку, сушиться протягом певного часу, після чого вивантажується, і цикл повторюється.
- установки безперервної дії — сушильні установки, де процес сушіння проходить без перерв, і матеріал постійно подається в систему, а готова продукція виводиться з неї без зупинок, що забезпечує безперервний потік виробництва.

За конструктивними ознаками устаткування:

- камери сушильні — сушильні установки, що працюють за принципом періодичної дії, де матеріал завантажується в спеціальні камери, де протягом певного часу відбувається сушіння.
- тунельні сушарки — сушильні установки безперервної дії, де матеріал переміщається через тунель, а сушильний агент (гаряче повітря або гази) рухається в напрямку,



перпендикулярному до напрямку матеріалу.

- вальцеві сушарки — сушильні системи, в яких матеріал сушиться на обертових вальцях, що можуть бути нагрітими, що дозволяє ефективно видаляти вологу.

- стрічкові сушарки — пристрої, в яких матеріал рухається по стрічці або конвеєру, а сушильний агент подається знизу або зверху для забезпечення рівномірного сушіння.

- шахтні сушарки — сушильні установки, де матеріал завантажується в вертикальну шахту, а сушильний агент подається через неї, забезпечуючи ефективно зневоднення.

- барабанні сушарки — обертові барабани, в яких матеріал переміщується і сушиться завдяки постійному контакту з гарячими поверхнями барабана, що дозволяє ефективно видаляти вологу

При сушінні овочів перспективним способом являється сублімаційне сушіння.

Сублімаційне сушіння продуктів (сублімаційна вакуумна сушка, або ліофілізація) - це процес видалення вологи з продуктів, що були попередньо заморожені, в умовах вакууму.

Наразі цей метод є найефективнішим, але водночас і найвитратнішим.

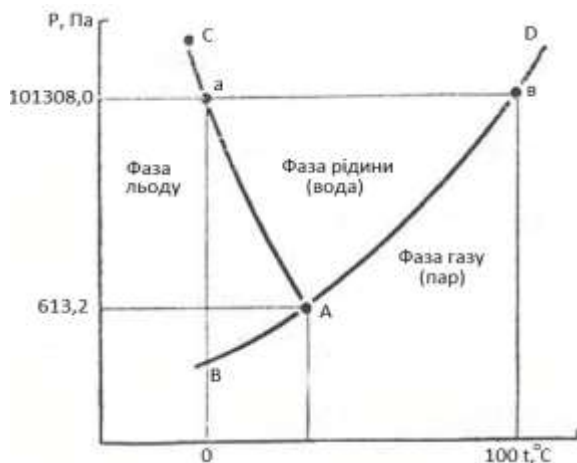


Рис. 1. Діаграма фазового стану чистої води

На діаграмі фазового стану чистої води (рис. 1) можна спостерігати існування одночасно трьох фаз за певних умов. Цей стан називається

потрійною точкою. Для води потрійна точка має наступні параметри: тиск пари 613 Па та температура 0,0098°C. Прикордонні криві на діаграмі поділяють її на три області, в яких вода може перебувати у вигляді рідини, твердого тіла або пари.

Сублімація — це процес сушіння, при якому відбувається фазовий перехід льоду в пару за умов, коли тиск і температура знаходяться нижче потрійної точки. Це явище характерне для процесу ліофілізації (сублімаційного сушіння), коли волога з продуктів видаляється без переходу через рідку фазу.

При сублімаційному сушінні відсутній контакт висушуваного матеріалу з киснем повітря, що дозволяє зберігати якість продукту і мінімізувати окислювальні процеси. Основна частина вологи (75-90%) видаляється через сублімацію льоду при температурі продукту нижче 0°C, а залишкова волога видаляється при температурах від 40 до 60°C. Повного виморожування вологи в продукті не досягається, оскільки невелика кількість вологи не вимерзає навіть при дуже низьких температурах.

Продукти, отримані методом сублімаційного сушіння, відрізняються високою якістю: вони добре зберігають харчові інгредієнти, мають підвищену поновлювальну здатність, мінімальну усадку та пористу структуру, що робить їх ідеальними для тривалого зберігання.

При цьому методі сушіння відбувається різке збільшення питомого об'єму пари. Якщо при атмосферному тиску об'єм 1 кг пари складає 1,72 м³, то при залишковому тиску 133 Па цей об'єм збільшується до 1000 м³, а при тиску 13,3 Па — до 10 000 м³. Це означає, що об'єм, який займає 1 кг вторинної пари, може бути в 1-10 мільйонів разів більшим за об'єм 1 кг льоду. Цей факт є важливим для технічного аспекту ліофілізації, оскільки вимагає спеціальних умов для ефективного відведення пари з камери сушіння.

Таблиця 1 – Параметри сублімаційної сушки підготовлених овочів

Продукт	Температура сублімації, °C	Товщина шару овочів, мм	Температура, °C		Тривалість сушіння, год
			продукту	гріючої поверхні	
Картопля	-12	4-6	45	22-49	6,7
Зелень петрушки	-14	5-6	43	13-48	8,3
Морква	-16	5-6	43	22-50	7,7
Буряк	-17	4	46	13-49	12,2
Біле коріння	-14	5-7	43	22-50	7,7
Цибуля	-17	3-4	46	10-48	11,0
Капуста	-12	4	46	16-50	9,5



Таблиця 2 – Витрата сировини при виробництві 1 кг сублімованих продуктів

№п/п	Назва сировини	Відносна вологість сировини, %	Відносна вологість сублімованого продукту, %	Відходи при підготовці сировини до сублімаційного сушіння, %	Витрати сировини на 1кг сублімованих продуктів, кг
1	Цибуля зелена	92,5	3-5	15	15,3
2	Цибуля ріпчата	86	3-5	18,5	8,5
3	Часник	70	3-5	20	4
4	Морква	89	3-5	20	11
5	Зелень (петрушка, селера, кріп и т.д.)	80-85	3-5	23	8,2
6	Буряк	86,5	3-5	29	9,6

Процес сублімаційного сушіння підрозділяється на три етапи.

Перший етап сублімаційного сушіння — це заморожування продукту, яке відбувається в швидкоморозильних установках або субліматорах. Процес заморожування починається зі зниження вакууму, при цьому матеріал охолоджується і самозаморажується за рахунок витрати теплоти на інтенсивне випаровування. У цей період випаровується 10-15% від загальної кількості вологи, без підведення тепла, завдяки виділенню теплоти плавлення льоду при замерзанні води.

Утворення кристалів льоду відбувається поступово, із поглибленням зони кристалізації. Процес заморожування завершується, коли температура всередині продукту досягає від мінус 5 до мінус 20°C. Тривалість заморожування зазвичай складає 10-15 хвилин. Якщо процес займає більше часу, можливе утворення великих кристалів льоду, які можуть пошкодити клітинні стінки та призвести до погіршення якості готового продукту.

Основна умова заморожування — максимальна кількість вологи повинна бути перетворена в лід. Крім того, кристали льоду мають бути мінімальними і рівномірно розподіленими по всьому об'єму продукту, щоб забезпечити ефективний тепло- і масообмін при подальшому процесі сублімаційного сушіння.

Зазначимо, що заморожування є важливим етапом не лише для твердих, а й для рідких продуктів. У випадку рідких матеріалів заморожування допомагає уникнути спінювання і забезпечити однорідну текстуру готового продукту.

Другий період сушіння — сублімація, або період постійної швидкості сушіння, є найважливішим етапом у процесі ліофілізації. У цей період з продукту видаляється основна маса вологи (60% і більше), що робить його ключовим для збереження властивостей продукту. Чим більше вологи видаляється під час сублімації, тим краще зберігаються смакові, харчові та фізико-хімічні властивості продукту.

Під час цього етапу виникає температурний градієнт по товщині продукту. Спочатку, коли лід починає сублімувати, температура поверхневого шару підвищується, а потім цей процес поширюється на більш глибокі шари матеріалу. Після того як весь лід випаровується, температура продукту підвищується, стає вище 0°C і наближається до температури навколишнього середовища.

Тривалість періоду сублімації залежить від кількох факторів:

- залишковий тиск в субліматорі (чим нижчий тиск, тим швидше йде процес сублімації);
- інтенсивність підведення теплоти до продукту;
- температура продукту (вона має бути оптимальною для сублімації);
- швидкість видалення пароповітряної суміші, що утворюється в процесі сушіння.

Інтенсивність сушіння в цей період відповідає інтенсивності випаровування води, і є стабільною, поки основна маса вологи ще не була видалена. Як тільки вся волога у вигляді льоду випаровується, процес переходить до третього етапу — випаровування залишкової вологи, що вимагає додаткового тепла для підвищення температури продукту.

Третій період сушіння — видалення залишкової вологи, або період падаючої швидкості сушіння, настає після завершення процесу сублімації льоду, коли температура продукту стає позитивною. У цей період відбувається видалення зв'язаної вологи, яка не була заморожена в продукті на попередніх етапах.

Швидкість сушіння на цьому етапі значно зменшується і залежить від кількох факторів:

- інтенсивність підведення теплоти до глибших шарів матеріалу;
- видалення пари з зони випаровування, яка повинна пройти через висохлі шари до поверхні продукту;



- структура та пористість продукту, що визначають, як ефективно волога може переміщатися і випаровуватися з продукту;

- форма і розмір частинок матеріалу також впливають на процес сушіння.

У цей період видаляється 10-20% від загальної кількості вологи в продукті. Температура продукту поступово підвищується, а швидкість сушіння падає.

Для забезпечення ефективного видалення залишкової вологи використовуються різні теплоносії, зокрема:

- вода;
- трихлоретилен;
- етиленгліколь та інші, з температурою не вище 40-70°C.

Температурна межа стійкості до нагрівання залежить від властивостей сушеного продукту. Для харчових продуктів цей діапазон зазвичай становить 40-50°C, а для продуктів рослинного походження рекомендуються м'якші режими досушування з температурою 35-40°C, щоб мінімізувати втрати біологічної цінності і зберегти смакові якості.

Кінцева вологість продукту після завершення сушіння повинна складати 3-4%, хоча в деяких випадках, коли передбачається тривале зберігання (наприклад, на кілька років), кінцева вологість може бути знижена до 1,5-2,0%. Це дозволяє значно збільшити термін зберігання та зберегти всі властивості продукту.

Загальна тривалість процесу сушіння значною мірою залежить від товщини шару матеріалу. Якщо матеріал розміщується товстим шаром, процес сушіння може тривати до 10 годин. Тому для зменшення часу сушіння важливим є оптимізація товщини шару, а також вибір методів підведення тепла.

В останні роки активно проводяться дослідження з використання інтенсивного підведення тепла за допомогою ІЧ-променів з довжиною хвилі 0,8-1,5 мкм і струмів високої частоти (від 10^9 до 10^{10} Гц). Ці методи дозволяють значно скоротити тривалість процесу сублімаційного сушіння, в кілька разів знижуючи час, необхідний для видалення вологи з продуктів.

Сублімаційне сушіння широко застосовується в таких країнах, як Європа, США та Китай, для обробки різних продуктів, зокрема:

- харчових продуктів,
- лікарських препаратів,
- ферментів,
- заквасок тощо.

В Україні сублімаційне сушіння в основному застосовується в медичній промисловості, зокрема для сушіння лікарських засобів, вакцин і біологічно активних речовин. У харчовій промисловості кількість установок для сублімаційного сушіння поки що обмежена, але існують поодинокі установки, розраховані на

одноразове завантаження сировини від 300 до 1000 кг.

Ці установки часто використовують радіаційне підведення енергії, при якому інтенсивне тепло подається через ІЧ-промені або високочастотні струми, що дозволяє ефективно сушити продукти без необхідності нагрівати їх до високих температур. Це не лише знижує час сушіння, а й дозволяє зберегти високу якість і поживну цінність продуктів.

Переваги сублімаційного сушіння:

- **висока якість продуктів:** після сублімаційного сушіння продукти зберігають майже всі свої початкові властивості, такі як смак, колір, об'єм і аромат, що робить їх привабливими для споживачів;

- **легка відновлюваність:** сушені продукти легко відновлюються при додаванні води, навіть у холодній воді, що зберігає їхню структуру і харчову цінність;

- **тривале зберігання:** продукти можуть зберігатися в приміщеннях з нерегульованою температурою протягом тривалого часу без значних змін якості.

Недоліки сублімаційного сушіння:

- **низький вміст вологи:** продукти після сублімації мають дуже низький вміст вологи (2-4%), що робить їх чутливими до поглинання вологи з навколишнього середовища;

- **схильність до окислення:** внаслідок сильної пористості і великої поверхні такі продукти схильні до окислення, що може привести до втрати вітамінів, ароматичних речовин і деградації ліпідів;

- **необхідність спеціальної упаковки:** для захисту від впливу вологи, кисню та світла використовують спеціальні упаковочні матеріали, що підвищує витрати на упаковку;

- **висока вартість:** сублімаційне сушіння є дорогим процесом через необхідність використання складного обладнання та енергетичних ресурсів.

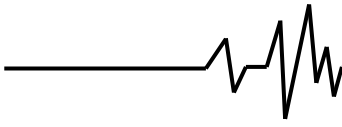
Інтенсифікація процесу: для зменшення витрат часу і енергії та підвищення ефективності сушіння активно використовуються струми високої частоти, які дозволяють підвищити інтенсивність процесу і скоротити час, необхідний для видалення вологи з продуктів.

Сушіння струмами високої частоти

Високочастотне сушіння є ефективним методом сушіння, що використовує енергію електричних і електромагнітних полів для швидкого видалення вологи з матеріалів. Підведення тепла в цьому процесі здійснюється за допомогою змінного електричного струму високої (10-25 мГц) і надвисокої (2000-2500 мГц) частоти, що сприяє швидкому прогріву вологих матеріалів.

Особливості високочастотного сушіння:

- **природа матеріалів:** вологі матеріали рослинного походження є діелектриками і мають



властивості напівпровідників. Їх склад включає іони електролітів, електрони, молекули полярних і неполярних діелектриків, які володіють дипольними моментами. Це означає, що ці молекули можуть реагувати на змінне електричне поле;

- **дія електромагнітного поля:** коли ці матеріали потрапляють в змінне електромагнітне поле (створене струмом високої або надвисокої частоти), диполі (молекули з позитивним і негативним зарядами) розташовуються в напрямку цього поля, намагаючись слідувати за його змінами. при цьому вони коливаються в такт з частотою змінного поля;

- **термічне виділення енергії:** в результаті коливань диполів, між молекулами матеріалу виникає тертя, що призводить до виділення теплоти. Також іони та електрони, що переміщуються в матеріалі під впливом змінного електричного поля, теж створюють тертя, яке генерує додаткове тепло. Це тепло поглинається матеріалом, що дозволяє швидко і ефективно випаровувати вологу;

- **принцип роботи конденсатора:** для сушіння матеріал поміщають між двома обкладками конденсатора, до яких підключено джерело струму високої або надвисокої частоти. обкладки мають протилежні заряди, тому іони і електрони в матеріалі переміщуються до обкладок з протилежними зарядами. при зміні зарядів на обкладках, іони і електрони переміщуються в протилежному напрямку, що також створює тертя і генерує тепло.

В цілому, високочастотне сушіння є перспективним методом для швидкої і ефективної обробки вологих матеріалів, особливо в таких галузях, як харчова, фармацевтична і хімічна промисловості.

У процесі високочастотного (НВЧ) нагріву сировини рослинного походження під дією змінного електричного поля на молекули матеріалу діють електромагнітні хвилі, що призводить до їх коливань. Ці коливання, в свою чергу, викликають тертя часток і утворення тепла. Ось ключові моменти цього процесу:

1. Нагрів за долі секунди: нагрів частинок матеріалу здійснюється **надзвичайно швидко** (за долі секунди) завдяки високій частоті електричних хвиль. У цей час матеріал нагрівається не лише на поверхні, а й всередині, що дозволяє прискорити процес сушіння порівняно з традиційними методами.

2. Градієнти температури і вологості:

• **градієнти температури та вологості:** через нерівномірний нагрів і випаровування вологості температура і вологість всередині матеріалу вищі, ніж на поверхні. Це створює градієнт температури і вологості, що сприяє переміщенню вологості зсередини матеріалу до поверхні для випаровування;

• **випаровування по всьому об'єму:** на відміну від традиційних методів, де випаровування відбувається тільки з поверхні, при високочастотному нагріванні випаровування відбувається по всьому об'єму матеріалу. Це збільшує ефективність процесу сушіння і дозволяє рівномірно зневоднювати продукт.

3. Регулювання температури за допомогою зміни напруженості поля: процес сушіння можна регулювати через зміну напруженості електричного поля. Це дає змогу варіювати температуру нагріву і оптимізувати процес для конкретного матеріалу. Точний контроль над температурою дозволяє уникнути перегріву і забезпечити ефективне сушіння без шкоди для якості продукту.

4. Діелектрична проникність:

• **діелектрична проникність** — це здатність матеріалу переходити енергію електромагнітних хвиль в теплоту. Вона залежить від таких факторів, як фізико-хімічні властивості, температура і вологовміст матеріалу. Для вологих матеріалів діелектрична проникність значно вища, що дозволяє хвилям ефективно проникати в матеріал і нагрівати його;

• **сухі матеріали** мають значно меншу діелектричну проникність, тому електромагнітні хвилі проникають глибше в матеріал з високим вмістом вологості. Зі зменшенням вологості діелектрична проникність зменшується, що зменшує глибину проникнення електричних хвиль і відповідно знижує ефективність нагріву.

5. Зміна глибини проникнення з температурою:

• з підвищенням температури діелектрична проникність зменшується, що дозволяє хвилям проникати глибше в матеріал. Зниження вмісту вологості також збільшує глибину проникнення електромагнітних хвиль;

• оскільки діелектричні втрати зменшуються, глибина проникнення хвиль збільшується. Це важливо для контролю рівномірності прогріву продукту. При занадто глибокому проникненні хвиль температура всередині продукту може бути вищою, ніж на його поверхні, що може призвести до перегріву внутрішніх частин і погіршення якості продукту.

6. Обмеження товщини продукту: для запобігання перегріву і забезпечення однорідного прогріву матеріалу товщина харчового продукту повинна бути обмежена. Оптимальна товщина продукту для високочастотного сушіння становить 20-30 мм. Це дозволяє забезпечити рівномірний прогрів і скоротити час термічної обробки, уникаючи перегріву внутрішніх шарів продукту.

7. Практичні рекомендації для харчових продуктів: більшість харчових продуктів, що обробляються за допомогою НВЧ-нагріву, повинні мати товщину, яка відповідає подвоєній величині проникнення хвиль даної частоти. Якщо товщина



продукту перевищує цю величину, внутрішні частини можуть прогріватися нерівномірно, що призведе до проблем з якістю і смаковими властивостями продукту.

8. Застосування НВЧ-нагріву:

- **ідеально для вологих матеріалів:** високочастотне сушіння ефективне для матеріалів, що містять значну кількість вологи, оскільки волога є чудовим поглиначем енергії електромагнітних хвиль.

- **застосування в харчовій промисловості:** НВЧ-сушіння активно використовується для сушіння різних харчових продуктів, таких як фрукти, овочі, м'ясо, а також для хлібобулочних виробів, де необхідно швидко і рівномірно видаляти вологу.

Переваги високочастотного сушіння:

- **швидкість процесу:** завдяки ефективному теплопередаванню і швидкому прогріву матеріалу сушіння відбувається значно швидше, ніж за допомогою традиційних методів;

- **рівномірність сушіння:** високочастотне поле дозволяє рівномірно прогрівати вологі матеріали, що допомагає уникнути перегріву поверхні і забезпечує більш рівномірне видалення вологи;

- **енергоефективність:** метод дозволяє знизити енергетичні витрати порівняно з традиційними методами теплового сушіння.

Недоліки:

- **високі вимоги до обладнання:** для високочастотного сушіння потрібне спеціалізоване обладнання, яке може бути дорогим в монтажі та обслуговуванні;

- **чутливість до властивостей матеріалу:** різні матеріали можуть по-різному реагувати на високочастотне поле, що може вимагати адаптації параметрів процесу для досягнення оптимальних результатів.

Використання електричного поля високої і надвисокої частоти для сушіння має численні переваги, такі як швидкість, рівномірність прогріву і ефективність вологи, що випаровується. Завдяки регулюванню температури і глибини проникнення хвиль цей процес можна оптимізувати для різних матеріалів, зберігаючи їх якість та властивості.

Мета роботи. Метою роботи є вибір принципової схеми сублімаційної СВЧ-сушіння харчових продуктів

Результати досліджень.

На основі аналізу та узагальнення даних вітчизняних та закордонних джерел інформації про технологію та результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу сушіння овочів, картоплі та фруктів обґрунтована принципова схема сублімаційної СВЧ-сушарки харчових продуктів.

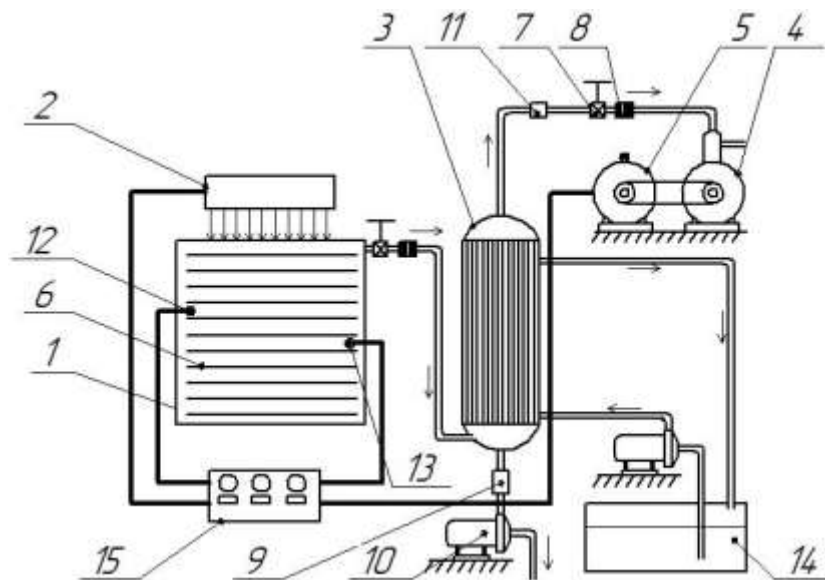


Рис. 2 - Принципова схема сублімаційної СВЧ-сушарки:

1 – субліматор; 2 – магнетрон; 3 – елементний конденсатор; 4 – вакуумний насос; 5 – електродвигун; 6 – листи з продуктом; 7 – сильфонний вентиль; 8 – сильфон; 9 – відкормлювач рідини; 10 – відцентровий насос; 11 – фільтр; 12 – датчик температури; 13 – датчик тиску; 14 – бак для холодної води; 15 – пульт керування.

До складу сублімаційної СВЧ-сушарки входить магнетрон 2 для нагрівання продукту до температури 40 °С який розміщується тонким шаром на листах 6 в сушильній камері 1 (субліматор);

конденсатор з розсілним охолодженням; вакуумний насос (для створення та підтримання вакууму).

Продукція завантажується в **сушильну камеру**, де включається насос для створення **вакууму**. Завдяки зниженому тиску вода переходить



в пару навіть при низьких температурах. Це дозволяє значно знизити температуру процесу і уникнути термічного пошкодження продуктів. При температурі **-10 ... -15 °C** в вакуумі відбувається інтенсивне **випаровування води** з продукту, де основна частина вологи випаровується саме на цьому етапі.

В процесі сушіння в **конденсатор** подається **холодний розсіл**. Це допомагає створити контраст температур між **продуктом** і **конденсатором** (різниця в температурі на рівні 20-30 °C). Такий температурний градієнт стимулює продовження процесу сушіння, оскільки **конденсація вологи** на холодних стінках конденсатора сприяє видаленню вологи з продукту.

Як тільки температура продукту наближається до температури конденсатора (що призводить до зменшення температурного градієнта), відбувається **включення магнетрону** — пристрою для генерації **високочастотних електромагнітних хвиль**.

Магнетрон забезпечує додаткове **енергетичне підведення** і **регульоване нагрівання продукту**. Це дозволяє створити умови для процесу **сублімації** — переходу вологи з **твердого стану (льоду)** безпосередньо в **газоподібний стан**, минаючи рідку фазу.

Після активації магнетрону температура продукту підвищується, і вода переходить в **пару**, що виводиться з продукту. Цей процес відбувається швидко завдяки **підвищеній температурі** та **низькому тиску**.

Завдяки **вакууму** і **високочастотному нагріванню** сушіння відбувається швидше, ніж за традиційними методами, з мінімальними втратами поживних речовин.

Використання **високочастотних хвиль** у поєднанні з **вакуумним сушінням** забезпечує високий рівень інтенсифікації процесу та дає можливість сушити матеріали швидше й ефективніше. Однак важливо дотримуватися певних температурних і часових режимів для забезпечення якісного результату, а також враховувати необхідність спеціальної упаковки для зберігання таких висушених продуктів.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Зниження вмісту вологи в продуктах є основним чинником, що допомагає: призупинити мікробіологічні процеси, зупинити ферментативні та біохімічні процеси, зберегти поживні речовини та запобігти утворенню шкідливих сполук.

2. Проведений аналіз існуючих способів сушіння показав, що перспективним способом являється сублімаційне сушіння у поєднанні із СВЧ енергопідведенням.

3. На основі аналізу та узагальнення даних вітчизняних та закордонних джерел інформації про технологію та результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу сушіння

овочів, картоплі та фруктів обґрунтована принципова схема сублімаційної СВЧ-сушарки харчових продуктів.

Для розробки, виготовлення та визначення конструктивно-технологічних параметрів роботи промислового зразка сублімаційної СВЧ-сушарки необхідно в подальшому виготовити експериментальну установку і провести необхідні дослідження.

Список використаних джерел

1. Haseley, P.; Oetjen, G.W. Freeze-Drying; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2018; p. 421.
2. Franks, F.; Auret, T. Freeze-Drying of Pharmaceuticals and Biopharmaceuticals; RSC Publishing: Cambridge, UK, 2008; p. 218.
3. Паламарчук І.П., Берник П.С., Стоцько З.А., Яськов В.В., Зозуляк І.А. Тепломасообмінні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посіб. Том 2. Львів: Видавництво „Бескид Біт”, 2006. 368 с.
4. Зозуляк І.А. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів інфрачервоної вібраційної сушарки. *Техніка, енергетика та транспорт АПК*. 2020. № 1 (108). С. 75-81. doi: 10.37128/2520-6168-2020-1-9
5. Зозуляк І.А. Обґрунтування конструкції вібростанини для сушіння гранульованих і зернистих матеріалів. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2014. № 1/7 (67). С. 15–19.
6. Bandura V., Zozulyak I., Palamarchuk V. Description of heat exchange in the similarity theory of vibrating drying process of sunflower. *Ukrainian Journal of Food Science* 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 305–311.
7. Burdo O. Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2017. Issue 4. P. 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399

References

1. Franks, F.; Auret, T. Freeze-Drying of Pharmaceuticals and Biopharmaceuticals; RSC Publishing: Cambridge, UK, 2008; p. 218.
2. Haseley, P.; Oetjen, G.W. Freeze-Drying; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2018; p. 421.
3. Palamarchuk, I.P., Berynyk, P.S., Stotsko, Z.A., Yaskov, V.V., Zozulyak, I.A. (2006). Heat and mass exchange processes and equipment of processing and food production : training. Lviv : "Beskid Bit" Publishing House. [in Ukrainian].
4. Zozulyak, I.A. (2020). Justification structural and technological parameters of the infrared vibrating dryer. *Technology, energy and transport of the agricultural industry*, 1 (108). 75–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-9. [in Ukrainian].
5. Zozulyak, I.A. (2014). Priming the structure of the vibrating machine for drying granular and



granular materials. Similar European Journal of Advanced Technologies, 1/7 (67). 15–19. [in Ukrainian].

6. Bandura V., Zozuliak I., Palamarchuk V. Description of heat exchange in the similarity theory of vibrating drying process of sunflower. *Ukrainian Journal of Food Science* 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 305–311.

7. Burdo O. Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2017. Issue 4. P. 18–24. doi: 10.21303/2461-4262.2017.00399

JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE SCHEMATIC DIAGRAM OF SUBLIMATION MICROWAVE DRYING OF FOOD PRODUCTS

This work is devoted to the research and substantiation of the technology and scheme of the equipment for drying vegetables, potatoes and fruits. At the same time, it is necessary that the products after such drying retain high quality (biological, nutritional and organoleptic properties), preserve food ingredients well, have an increased regenerative capacity, have little shrinkage and a porous structure.

The analysis of existing drying methods showed that sublimation (lyophilization) drying is a promising method.

Freeze drying is a process in which water is sublimated by directly converting water from a solid state (ice) to vapor, thus lowering the liquid state, and then desorbs the water from the "dry" layer. It is widely used

to stabilize high-quality food, biological materials and pharmaceuticals such as proteins, vaccines, bacteria. The process preserves the quality of the dried product (biological, food and organoleptic properties). This is because the freezing of water in the material before lyophilization inhibits chemical, biochemical and microbiological processes. Therefore, the taste, smell and content of various nutrients do not change. Food raw materials contain a lot of water - from 80 to 95%. The removal of water by sublimation leads to the creation of a highly porous structure of lyophilized products, and rehydration of lyophilized products occurs immediately.

The effect of freeze-drying should be considered from the economic aspect and the quality of the freeze-dried material. The cost of the product mainly depends on the freeze drying time. Therefore, process parameters and other conditions of its course are often set so that its time is as short as possible. Setting parameters to speed up the process can lead to deterioration of product properties.

Based on the analysis and generalization of data from domestic and foreign sources of information about the technology and the results of theoretical and experimental studies of the process of drying vegetables, potatoes and fruits, the principle scheme of the sublimation microwave dryer of food products is substantiated.

Key words: sublimation, freeze-drying, vegetables, potatoes, fruits, microwave drying, temperature, dehumidification, moisture content, physical and mechanical properties, thermophysical characteristics, heat capacity, thermal conductivity.

Відомості про авторів

Зозуляк Ігор Анатолійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві, Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: zozulak@vsau.vin.ua) <https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>

Кондратюк Дмитро Гнатович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, kondratuk@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1827-1717>).

Коробко Дмитро Олександрович – аспірант кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: korobkodima4@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0003-3906-6402>

Zozulyak Igor - candidate of technical sciences, senior lecturer of the department labor protection and biotechnical systems in animal husbandry, Vinnytsia of the National Agrarian University (Str. Sonyachna, 3, m. Vinnytsia, 21008, Ukraine, email : zozulak@vsau.vin.ua) <https://orcid.org/0000-0002-5381-3115>

Kondratuk Dmytro – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Services of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, kondratuk@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1827-1717>).

Korobko Dmytro - graduate student of the department of labor protection and biotechnical systems in animal husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University: (Str. Sonyachna, 3, m. Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: korobkodima4@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0003-3906-6402>