

Національна академія наук України  
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Граков Дмитро Павлович**

УДК 664.8.047

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ТА АВТОМАТИЧНИЙ  
КОНТРОЛЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАРОТИНОВМІСТНОЇ СИРОВИНИ**

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Дмитро ГРАКОВ

Науковий керівник – Петрова Жанна Олександрівна, член-кореспондент НАН  
України, доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Граков Д.П.* Інтенсифікація тепломасообміну та автоматичний контроль процесу сушіння каротиновмісної сировини. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена інтенсифікації процесу тепломасообміну при сушінні каротиновмісної сировини.

Сьогодні у світі стоїть питання збереження функціональних елементів та зменшення енерговитрат при сушінні харчових продуктів. Сушіння належить до складних енергоємних технологічних процесів. Найбільш поширеним методом консервації, тобто збереження рослинної та тваринної сировини, є сушіння, які практикує людство. Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту.

Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв на процеси сушіння та дозволяють зберігати мікро- та макроелементи у сухому продукті.

Найбільш поширеними та вживаними в Україні є кароновоїмісні продукти, такі як морква та гарбуз. Каротиноїди це клас терпеноїдних пігментів, які головним чином відповідають за яскраво-жовтий, помаранчевий і червоний кольори квітів і плодів рослин.  $\beta$ -каротин є важливим каротиноїдом, а також найпоширенішим каротиноїдом, що міститься в рослинах.  $\beta$ -каротин найбільш відомий як попередник вітаміну А, який необхідний для зору, імунних функцій і здоров'я шкіри.

Гарбуз та морква належать до сезонних продуктів та мають терміни зберігання, які можливо збільшувати завдяки консервуванню, а саме сушінню.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у п'яти розділах, у яких пред-

ставлені та обґрунтовані основні результати.

У **вступі** обґрунтовується обрана тема дослідження та її актуальність, формуються цілі та завдання дослідження, надаються дані про зв'язок роботи з науковими програмами, пояснюється наукова новизна та практичне значення результатів. Також надається інформація про прийняття результатів дослідження та список публікацій.

У **першому розділі** виконано літературного огляду існуючих методів та обладнання для сушіння каротиномісної сировини. З вищенаведеного літературного огляду випливає, що відомі способи переробки каротиномісної рослинної сировини характеризуються або високими енерговитратами та низькою продуктивністю, або низькою якістю отриманого продукту. Тому постає завдання дослідити інтенсифікацію процесу тепломасообміну при сушінні каротиномісної сировини та розробити енергоефективну теплотехнологію.

У **другому розділі** представлено матеріали та методи для проведення і обробки експериментальних досліджень. Наведено опис установок та приладів, які використанні для виконання досліджень.

У **третьому розділі** проведено попередню підготовку каротиномісної сировини та створення композицій, що дозволило зменшити витрати каротиноїдів до 5-8%.

Виконано дослідження сушіння на експериментальному стенді каротиномісної сировини на основі гарбуза та моркви за різних режимних параметрів. Проведені дослідження сушіння гарбузово-хурмяної композиції показали доцільність використання ступеневого 100/65 °С та комбінованого 3800Вт/м<sup>2</sup>+65 °С режимів, які дозволили зменшити тривалість сушіння у 1,12 рази порівняно з режимом 65 °С. Отримані результати сушіння морквяно-селерної композиції показали, що тривалість процесу за ступневим режимом 100/70 °С зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °С. Також виконані дослідження з сушіння білково-каротиномісної сировини на основі моркви показали, що використання ступневих режимів дозволяє зменшувати тривалість процесу.

Виконано дослідження вмісту каротину у висушеній рослинній сировині, які

показали, що застосування ступеневих режимів сушіння забезпечують збереження каротиноїдів на рівні 87 – 90%.

Визначені регідраційні властивості каротиновмістних матеріалів, які показали доцільність розроблених режимів сушіння. Створення сумішей дозволяє зменшити час відновлення у 1,6-2,3 рази, що свідчить про більш інтенсивне проникнення води до матеріалу.

Виконано розрахунок кінетики теплообміну під час сушіння каротиновмістної рослинної сировини, який дозволив отримати формули тривалості сушіння, зміни критерію оптимізації сушіння, густини теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі.

У **четвертому розділі** виконано оснащення існуючої сушарки KLARSTEIN додатковими датчиками температури, вологи, модулем збору та обробки даних, які дозволяють розробити в подальшому автоматизований контроль даної установки. Розроблено автоматичний контроль сушіння, який дозволяє керувати процесом, для оптимізації його, а також забезпечення стандартів та якості.

У **п'ятому розділі** розроблені теплотехнології для переробки каротиновмістної сировини на основі гарбуза та моркви.

У **загальних висновках** автором представлені наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- на основі результатів комплексу виконаних експериментальних досліджень розроблена підготовка сировини до сушіння, за якої зменшуються втрати каротиноїдів до 5-8%;
- визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння каротиновмістної рослинної сировини, які дозволяють інтенсифікувати процес порівняно з монокомпонентами;
- розраховані відносні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння білково-каротиновмістної сировини, які обґрунтовують обрані режими;
- розрахована густина теплового потоку, яка витрачається на випарову-

вання вологи в залежності від інтенсивності випаровування і вологовмісту матеріалу;

- розроблена система, що дозволяє у режимі реального часу стежити за динамікою зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів в процесі сушіння, шляхом вимірювання зміни маси з високою частотою дискретизації та обчисленням поточної вологості.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено інноваційні теплотехнології отримання композитних антиоксидантних каротиновмістних порошків на основі моркви та гарбуза.

- розроблена система, яка забезпечує повний цикл контролю процесу сушіння - від точного вимірювання параметрів і збереження даних у кількох незалежних сховищах, до наочної візуалізації та автоматичних сповіщень.

- завдяки модульній архітектурі систему легко масштабувати: одночасно вона може обслуговувати десятки модулів, а при розширенні мережевої інфраструктури — навіть сотні, підключаючи нові датчики, додаткові камери сушіння чи цілі виробничі лінії без зупинки роботи

- оптимізація виробничих процесів сушіння, забезпечення стандартів та якості готової продукції, з можливістю подальшої автоматизації.

- можливість автоматичного визначення недоліків сушарок, використовуючи дані інфрачервоної камери.

- поданий патент України на винахід «Спосіб одержання харчового порошку з хурми та гарбуза».

- отриманий патент WO 2024/061650 A1 – Appliance connection plug-in connector with light indicator

- отриманий патент WO 2024/067911 A1 – Method for configuration of access control to power supply

**Ключові слова:** *сушіння, енергоефективність, каротиновмістні матеріали, морква, гарбуз.*

## ANNOTATION

*Grakov D.P.* Intensification of heat and mass transfer and automatic control of the drying process of carotene-containing raw materials. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 – Thermal Power Engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to intensifying the process of heat and mass transfer during the drying of carotene-containing raw materials.

Today, the world faces the issue of preserving functional elements and reducing energy consumption during the drying of food products. Drying is a complex, energy-intensive technological process. The most common method of preservation, i.e. the preservation of plant and animal raw materials, is drying, which has been practised by mankind for centuries. During drying, many changes occur, such as structural and physicochemical modifications, which can affect the quality of the final product.

Therefore, there are pressing issues regarding the creation and large-scale implementation of modern energy-efficient heat technologies that reduce energy consumption in drying processes and allow micro- and macroelements to be preserved in the dried product.

The most common and widely used carotenoid-containing products in Ukraine are carrots and pumpkins. Carotenoids are a class of terpenoid pigments that are mainly responsible for the bright yellow, orange and red colours of flowers and fruits.  $\beta$ -carotene is an important carotenoid and also the most common carotenoid found in plants.  $\beta$ -carotene is best known as a precursor to vitamin A, which is essential for vision, immune function and skin health.

Pumpkins and carrots are seasonal products and have a limited shelf life, which can be extended through preservation, namely drying.

The content of the dissertation research is presented in five chapters, which present and substantiate the main results.

**The introduction** justifies the chosen research topic and its relevance, formulates the goals and objectives of the research, provides data on the connection between the work and scientific programmes, explains the scientific novelty and practical significance of the results. It also provides information on the acceptance of the research results and a list of publications.

**The first chapter** provides a literature review of existing methods and equipment for drying carotenoid-containing raw materials. The above literature review shows that known methods for processing carotenoid-containing plant raw materials are characterised by either high energy consumption and low productivity or low product quality. Therefore, the task is to investigate the intensification of the heat and mass transfer process during the drying of carotenoid-containing raw materials and to develop energy-efficient heat technology.

**The second chapter** presents the materials and methods used to conduct and process experimental studies. It provides a description of the equipment and devices used to perform the studies.

**The third chapter** describes the preliminary preparation of carotenoid-containing raw materials and the creation of compositions, which made it possible to reduce carotenoid consumption to 5-8%.

A study was conducted on the drying of carotene-containing raw materials based on pumpkin and carrots under various operating parameters on an experimental stand. Studies of drying pumpkin and persimmon compositions showed the feasibility of using a 100/65 °C stepwise mode and a combined 3800W/m<sup>2</sup> +65 °C mode, which reduced the drying time by 1.12 times compared to the 65 °C mode. The results obtained for drying a carrot and celery mixture showed that the duration of the process under a 100/70 °C stepwise mode is reduced by 1.92 times compared to 60 °C. Studies on the drying of protein- and carotene-containing raw materials based on carrots also showed that the use of step modes allows the duration of the process to be reduced.

Research was conducted on the carotene content in dried plant raw materials, which showed that the use of stepwise drying modes ensures the preservation of carotenoids at a level of 87–90%.

The rehydration properties of carotene-containing materials were determined, which showed the feasibility of the developed drying regimes. The creation of mixtures allows reducing the recovery time by 1.6–2.3 times, which indicates a more intensive penetration of water into the material.

The kinetics of heat exchange during the drying of carotene-containing plant raw materials were calculated, which made it possible to obtain formulas for the duration of drying, changes in the drying optimisation criterion, heat flux density and heat transfer coefficient.

**In the fourth chapter**, the existing KLARSTEIN dryer was equipped with additional temperature and humidity sensors and a data collection and processing module, which will allow for the development of automated control of this installation in the future. An automatic drying control system was developed, which allows the process to be managed in order to optimise it and ensure standards and quality.

**The fifth chapter** describes thermal technologies for processing carotenoid-rich raw materials based on pumpkin and carrots.

**In the general conclusions**, the author presents the scientific and practical results of the dissertation research.

**The scientific novelty of the results obtained lies in the following:**

- Based on the results of a series of experimental studies, a method for preparing raw materials for drying has been developed, which reduces carotenoid losses to 5-8%.

- The kinetic patterns of convective drying of carotenoid-containing plant raw materials have been determined and generalised, allowing the process to be intensified compared to monocomponents.

- Relative drying coefficients have been calculated and formulas for the drying time of protein- and carotene-containing raw materials have been obtained, which justify the selected modes.

- The heat flux density consumed for moisture evaporation has been calculated depending on the evaporation intensity and moisture content of the material.

- A system has been developed that allows real-time monitoring of the dynamics of dehydration of colloidal capillary-porous materials during the drying process by

measuring mass changes at a high sampling rate and calculating the current moisture content.

**Practical significance of the results obtained:**

- Innovative thermal technologies have been developed for obtaining composite antioxidant carotene-containing powders based on carrots and pumpkins.
- A system has been developed that provides a complete cycle of drying process control — from accurate measurement of parameters and data storage in several independent repositories to visualisation and automatic notifications.
- Thanks to its modular architecture, the system is easy to scale: it can simultaneously serve dozens of modules, and with the expansion of the network infrastructure — even hundreds, connecting new sensors, additional drying chambers or entire production lines without stopping work.
- Optimisation of drying production processes, ensuring standards and quality of finished products, with the possibility of further automation.
- ABILITY to automatically detect dryer defects using infrared camera data.
- Ukrainian patent filed for the invention ‘Method for obtaining food powder from persimmon and pumpkin’.
- Patent WO 2024/061650 A1 obtained – Appliance connection plug-in connector with light indicator.
- Patent WO 2024/067911 A1 obtained – Method for configuration of access control to power supply.

**Key words:** *drying, energy efficiency, carotene-containing materials, carrots, pumpkin.*

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М., & Граков, Д.П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр.*, 1(33), 109-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036102> [Google Scholar, Index Copernicus, Academic Research Index (ResearchBib) та інші] (Внесок здобувача: проведення літературного огляду).
2. Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Вишнівський В.М., Граков Д.П., Граков О.П. Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2021. 43 (3). С. 24 – 29 <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.3> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
3. Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Bessarab O., Samoilenko K., Grakov D., Petrov P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 2023. Volume 12. Issue 3, p. 444-457, DOI: 10.24263/2304-974X-2023-12-3-10 [Фахове видання, SCOPUS, Q3] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
4. Петрова, Ж.О., & Граков, Д.П. (2025). Тепломасообмінні процеси під час одержання комбінованих каротиновмісних продуктів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 47(1), 30-40. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.3> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
5. Петрова, Ж.О., & Граков, Д.П. (2025). Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні білково-каротиновмісних матеріалів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 47(2), 28-37. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.3> [Фахове

видання, *Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

6. Слободянюк, К.С., Граков, О.П., & Граков, Д.П. (2021). Енергоефективне сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 106 – 107). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

7. Петрова, Ж. О., Самойленко, К. М., Новікова, Ю. П., & Граков, Д. П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології»* (с. 76 – 78). Київ: Національний авіаційний університет. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Petrova, Zh. O., Samoilenko, K.M., & Grakov, D. P. (2023). Functional products are the basis of healthy nutrition. *Матеріали X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини»* (с. 76 – 78). Прага : Oktan Print s.r.o.. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

9. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Grakov, D. (2025). Study of drying of composite raw materials based on pumpkin and persimmon. *Proceedings of the VIII International Scientific and Theoretical Conference «Current issues of science, prospects and challenges»* (с. 60 – 62). Sydney, Australia: International Center of Scientific Research. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

***Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:***

10. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М., Граков, Д.П., & Граков, О.П. (2022). Підвищення ефективності сушіння рослинної сировини в тунельних та комбінованих сушарках. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 203 - 220). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення літературного огляду).

11. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Новікова, Ю.П., & Граков, Д.П. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з хурми та гарбуза (Заявка № а202406228). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення способу одержання харчового порошку з хурми та гарбуза, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

12. Friesen, M., Loske, F.DR., Grakov, D., Cording, C., & Riechmann, T. (2024). Appliance connection plug-in connector with light indicator. (Patent WO2024061650A1). Weltorganisation für geistiges Eigentum. Internationales Büro (Внесок здобувача: розробка та створення роз'єму, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

13. Friesen, M., Grakov, D. (2024). Method for configuration of access control to power supply. (Patent WO2024067911A1). Weltorganisation für geistiges Eigentum. Internationales Büro (Внесок здобувача: розробка та створення методу, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПЕРЕРОБКИ КОЛОЇДНОЇ КАПЛЯРНО–ПОРИСТОЇ СИРОВИНИ СУШІННЯМ .....	21
1.1. Каротиновмісна сировина рослинного походження як об’єкт сушіння.	21
1.2. Огляд існуючих способів сушіння каротиновмісної рослинної сировини .....	27
1.3. Види сушильного обладнання для сушіння каротиновмісної рослинної сировини .....	34
1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження .....	46
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
2.1. Матеріали досліджень .....	47
2.2. Експериментальні установки та методики досліджень .....	53
2.2.1. Експериментальний конвективний сушильний стенд .....	53
2.2.2. Методика визначення каротиноїдів в сировині .....	58
2.2.3. Спектрофотометр СФ – 26 .....	60
2.2.4. Методики визначення регідратаційних властивостей сухих каротиновмістних матеріалів.....	61
2.3. Висновки до другого розділу.....	62
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПЛЯРНО–ПОРИСТИХ КАРОТИНОВМІСТНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	63
3.1. Попередня підготовка каротиновмісної сировини та створення сумішей .....	63
3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння гарбузово-хурмяної суміші.....	66
3.3. Дослідження кінетики сушіння каротиновмісної сировини на основі моркви на конвективному сушильному стенді.....	69

3.3.1. Дослідження кінетики сушіння морквяно-селерної суміші .....	70
3.3.2. Дослідження кінетики сушіння білково-морквяної суміші.....	71
3.4. Дослідження вмісту каротинів у сушеній рослинній сировині.....	75
3.5. Дослідження регідратаційних властивостей сухих каротиновмістних матеріалів .....	79
3.6. Розрахунок кінетики теплообміну під час сушіння каротиновмісної рослинної сировини.....	81
3.7. Висновки до третього розділу.....	94
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СУШІННЯ НА ПРОМИСЛОВІЙ СУШАРЦІ .....</b>	<b>96</b>
4.1. Апробація кінетики сушіння каротиновмісної сировини на основі моркви з використанням удосконаленої сушарки KLARSTEIN....	96
4.2. Опис сушарки KLARSTEIN .....	96
4.3. Опис удосконалення сушарки KLARSTEIN та процесу сушіння моркви .....	98
4.4. Недоліки сушарки KLARSTEIN та можливі покращення в майбутньому .....	104
4.5. Висновки до четвертого розділу.....	105
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ КАРОТИНОВМІСТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>106</b>
5.1. Технологія отримання композитних каротиномістних порошків .....	106
5.2. Технологія отримання білково-каротиномістних порошків .....	108
5.3. Висновки до четвертого розділу.....	109
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>112</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>126</b>
<b>ДОДАТОК Б. ....</b>	<b>130</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>133</b>
<b>ДОДАТОК Г. ....</b>	<b>135</b>
<b>ДОДАТОК Д.....</b>	<b>136</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

$W$  – вологість, %;

$W^c$  – вологість по відношенню до маси сухої речовини, %;

$u$  – вологовміст, кг вол/кг с.р.;

$m$  – маса, г;

$N$  – швидкість сушіння, %/хв;

$\tau$  – тривалість, с;

$t$  – температура теплоносія, °С;

$v$  – швидкість теплоносія, м/с;

$\chi$  – відносний коефіцієнт сушіння;

$Rb$  – критерій оптимізації сушіння;

$b$  – температурний коефіцієнт сушіння;

$c$  – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С);

$r$  – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг;

$q(t)$  – тепловий потік на одиницю поверхні зразка, кВт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт / (м<sup>2</sup>·°С).

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сьогодні у світі стоїть питання збереження функціональних елементів та зменшення енерговитрат при сушінні харчових продуктів. При цьому до складних енергоємних технологічних процесів належить сушіння.

Сушіння є одним з класичних методів збереження та консервації овочів, фруктів, м'ясної сировини, які практикує людство [1, 2]. Використання сушіння, як консервації, завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах, що запобігає гниттю [2 -11].

Процес сушіння призводить до суттєвого зменшення ваги та об'єму, мінімізуючи витрати на пакування, зберігання та транспортування, а також забезпечує можливість зберігання продукту за температури навколишнього середовища [12]. Сушіння супроводжується тепло- і масообміном між сушильним агентом та вологою в матеріалі [13 - 15].

Під час сушіння відбувається багато змін, такі як структурні та фізико-хімічні модифікації, які можуть вплинути на якість кінцевого продукту [1, 16].

Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв на процеси сушіння та дозволяють зберігати мікро- та макроелементи у сухому продукті.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно плану НДР Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» за науковою тематикою: 1.7.1.897 «Інтенсифікація тепломасопереносу при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та розроблення енергоефективного сушильного обладнання» (ДР 0120U103352), у якій автор бере участь як виконавець, приймає участь в проведенні експериментальних досліджень, аналізі та обробці дослідних даних, підготовці публікацій.

**Мета та завдання дослідження.** Мета дослідження є інтенсифікація тепло-

масообміну та автоматичний контроль процесу сушіння каротиновмісної рослинної сировини.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні задачі дослідження:

- проаналізувати науково-технічну, патентну літературу за дослідженнями тепломасообмінних процесів при переробці каротиновмісної рослинної сировини;
- розробка режимів підготовки каротиновмісної сировини до сушіння;
- дослідити кінетику процесу сушіння та розробити енергоефективні режими зневоднення каротиновмісної рослинної сировини;
- розрахувати кінетику вологообміну досліджуваної каротиномісної рослинної сировини;
- визначити втрати каротиноїдів в матеріалі після сушіння;
- оснащення існуючої сушарки системою, яка забезпечує автоматично повний цикл контролю процесу сушіння;
- розробити енергоефективну теплотехнологію отримання каротиномістних порошоків.

**Об’єкт дослідження** – процеси при сушінні каротиновмісної сировини.

**Предмет дослідження** – види сировини: морква, гарбуз, селера, соя, хурма та їх композитні суміші, технології та обладнання переробки їх на сушену продукцію.

**Методи дослідження.** Експериментальні дослідження проводились із використанням експериментального методу дослідження кінетики конвективного сушіння, для оцінки якості сушеного матеріалу використані стандартні методи дослідження визначення каротиноїдів, регідраційних властивостей, розрахунки теоретичного дослідження тепломасопереносу здійснювалися засобами програмування.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються:**

Достовірність отриманих наукових положень та висновків сформульованих

в дисертації обґрунтовано методами та збігом теоретичних і експериментальних результатів досліджень.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- на основі результатів комплексу виконаних експериментальних досліджень розроблена підготовка сировини до сушіння, за якої зменшуються втрати каротиноїдів до 5-8%;
- визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння каротиновмістної рослинної сировини, які дозволяють інтенсифікувати процес порівняно з монокомпонентами;
- розраховані відносні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння білково-каротиновмістної сировини, які обґрунтовують обрані режими;
- розрахована густина теплового потоку, яка витрачається на випаровування вологи в залежності від інтенсивності випаровування і вологовмісту матеріалу;
- розроблена система, що дозволяє у режимі реального часу стежити за динамікою зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів в процесі сушіння, шляхом вимірювання зміни маси з високою частотою дискретизації та обчисленням поточної вологості.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено інноваційні теплотехнології отримання композитних антиоксидантних каротиновмістних порошоків на основі моркви та гарбуза.
- розроблена система, яка забезпечує повний цикл контролю процесу сушіння - від точного вимірювання параметрів і збереження даних у кількох незалежних сховищах, до наочної візуалізації та автоматичних сповіщень.
- завдяки модульній архітектурі систему легко масштабувати: одночасно вона може обслуговувати десятки модулів, а при розширенні мережевої інфраструктури — навіть сотні, підключаючи нові датчики, додаткові камери сушіння чи цілі виробничі лінії без зупинки роботи.

- оптимізація виробничих процесів сушіння, забезпечення стандартів та якості готової продукції, з можливістю подальшої автоматизації.
- можливість автоматичного визначення недоліків сушарок, використовуючи дані інфрачервоної камери.
- поданий патент України на винахід «Спосіб одержання харчового порошку з хурми та гарбуза».
- отриманий патент WO 2024/061650 A1 – Appliance connection plug-in connector with light indicator
- отриманий патент WO 2024/067911 A1 – Method for configuration of access control to power supply

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем виконано аналіз літератури, основний обсяг експериментальної роботи, обробку та аналіз отриманих даних. Участь у постановці загальної задачі досліджень, трактування та узагальнення експериментальних результатів. Підготовка доповідей та статей.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на XIX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали» (Київ, 2021), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2022), X міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини» (Прага, 2023), VIII International Scientific and Theoretical Conference «Current issues of science, prospects and challenges» (Sydney, Australia, 2025).

**Публікації.** Основні положення та наукові результати викладено у 13 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 3 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 1 стаття у науковому виданні, які включено до міжнародних наукометричної баз даних Scopus; 2 статті у наукових виданнях України; опубліковано 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, подано 1 заявку патенту України на винахід та отримано 2 міжнародних патенти на винахід.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 139 сторінках, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 91 сторінка, включно 67 рисунків, 4 таблиць та 5 додатків. Список використаних джерел містить 121 найменувань.

## **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПЕРЕРОБКИ КОЛОЇДНОЇ КАПЛЯРНО-ПОРИСТОЇ СИРОВИНИ СУШІННЯМ**

### **1.1. Каротиновмістна сировина рослинного походження як об'єкт сушіння**

У сучасну епоху харчова промисловість стикається з численними викликами, такими як зростання обізнаності споживачів щодо здоров'я, харчування та сталого розвитку [17 – 19]. Споживачі тепер усвідомлюють вплив штучних добавок, хімічних консервантів, надмірного споживання цукру чи жиру та високооброблених харчових продуктів, що спонукає до переходу до функціональних і чистих харчових продуктів [20]. Функціональні харчові продукти включають різні біологічно активні компоненти в ефективних дозах, які виходять за рамки простого харчового ефекту, надаючи переваги в профілактиці та полегшенні початку захворювань [21].

Поживні речовини, які забезпечують енергією, такі як ліпіди, вуглеводи та білки, відомі як макроелементи. Навпаки, вітаміни та інші органічні сполуки, які необхідні в незначних кількостях і не беруть безпосереднього внеску в енергетичний обмін, називають мікроелементами або біоактивними сполуками [22].

Деякі вітаміни та біологічно активні речовини, які забезпечились без змін, в харчовій сировині називають функціональними інгредієнтами [23]. Харчові продукти, які повноцінні, збагачені або покращені функціональними інгредієнтами називають функціональними харчовими продуктами або нутрицевтиками та можуть сприяти здоров'ю, окрім основної функції забезпечення основними поживними речовинами [24, 25].

Біологічно активні речовини, які природньо присутні в їжі, проявляють такі властивості, як антиоксидантні, протизапальні, імуномоделюючі та інші [26].

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Жанною Олександрівною розроблено класифікацією основних рослинних функціональних інгредієнтів, які залишилися у сухих продуктах: антиоксидантні, фітоестрогенні, фолатовмісні та пребіотичні [27].

Найбільш поширеними з функціональних інгредієнтів є антиоксиданти. Антиоксиданти — це молекули, які достатньо стабільні, щоб віддавати електрони вільним радикалам, зокрема кисню, в подальшому нейтралізують його, таким чином зменшуючи його здатність до окислення [28]. Вони також затримують або пригнічують клітинне пошкодження головним чином завдяки своїй властивості поглинати вільні радикали [29]. Деякі антиоксиданти, включаючи глутатіон, убіхінол і сечову кислоту, виробляються під час нормального метаболізму в організмі [30]. Інші більш легкі антиоксиданти містяться в їжі. Хоча в організмі існує кілька систем ферментів, які поглинають вільні радикали, основними мікроелементами (вітамінами) антиоксидантами є каротиноїди, вітамін Е ( $\alpha$ -токоферол) і вітамін С (аскорбінова кислота) [31]. Організм не може виробляти ці мікроелементи, тому вони повинні надходити з їжею.

Каротиноїди продемонстрували значний потенціал для прогресу з антиоксидантів у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості завдяки своїй багатій харчовій цінності та функціональним властивостям.[32, 33]

Каротиноїди, клас терпеноїдних пігментів, головним чином відповідають за яскраво-жовтий, помаранчевий і червоний кольори квітів і плодів рослин [3, 4]. Вони виробляються різними рослинами, бактеріями та грибами [34-36]. За хімічною природою каротиноїди це полімери вуглеводню і складають ланцюг із 40 вуглецевих атомів, побудований з 8 залишків ізопрену [37]. На рис.1.1. представлена структурна формула  $\beta$ -каротину [38].

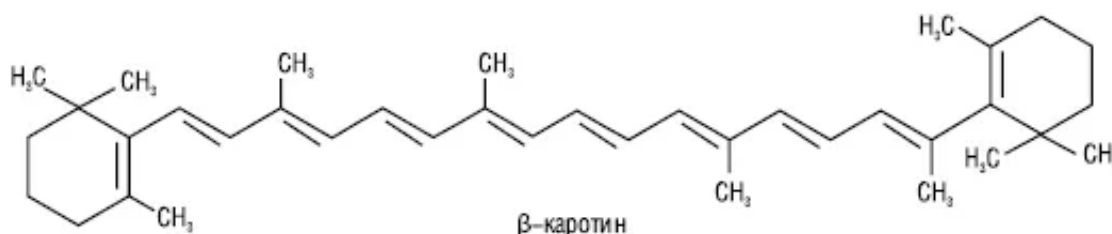


Рис. 1.1. Структурна формула  $\beta$ -каротину [38]

Каротиноїди не можуть бути синтезовані людиною, і їх необхідно отримувати з харчових джерел. Одним з найважливіших джерел каротиноїдів для людини є рослини. Фрукти та овочі, які споживає людина, забезпечують більшість із 40–50 різних каротиноїдів, що містяться раціоні [39]. Найважливіші каротиноїди

в раціоні людини були виявлені в різних рослинах до середини 20 століття і включають  $\beta$ -каротин з моркви, лікопін з помідорів, лютеїн з листової зелені, криптоксантин з папайї та зеаксантин з кукурудзи [26].

$\beta$ -каротин є важливим каротиноїдом, а також найпоширенішим каротиноїдом, що міститься в рослинах [40]. Це органічна сполука червоно-оранжевого кольору, яка міститься в рослинах, фруктах і грибах [41].  $\beta$ -каротин найбільш відомий як попередник вітаміну А, який необхідний для зору, імунних функцій і здоров'я шкіри.

Каротиноїди мають різноманітні біологічні дії, такі як властивості поглинання радикалів, протизапальну дію та активність провітаміну А, що робить їх привабливими для численних застосувань у медицині. Лютеїн,  $\beta$ -каротин і зеаксантин заслуговують на особливу увагу через їх виняткове накопичення у високих концентраціях у жовтій плямі сітківки. Це накопичення допомагає захистити від вікової дегенерації жовтої плями (ВМД), зменшуючи індукований світлом окислювальний стрес [42].

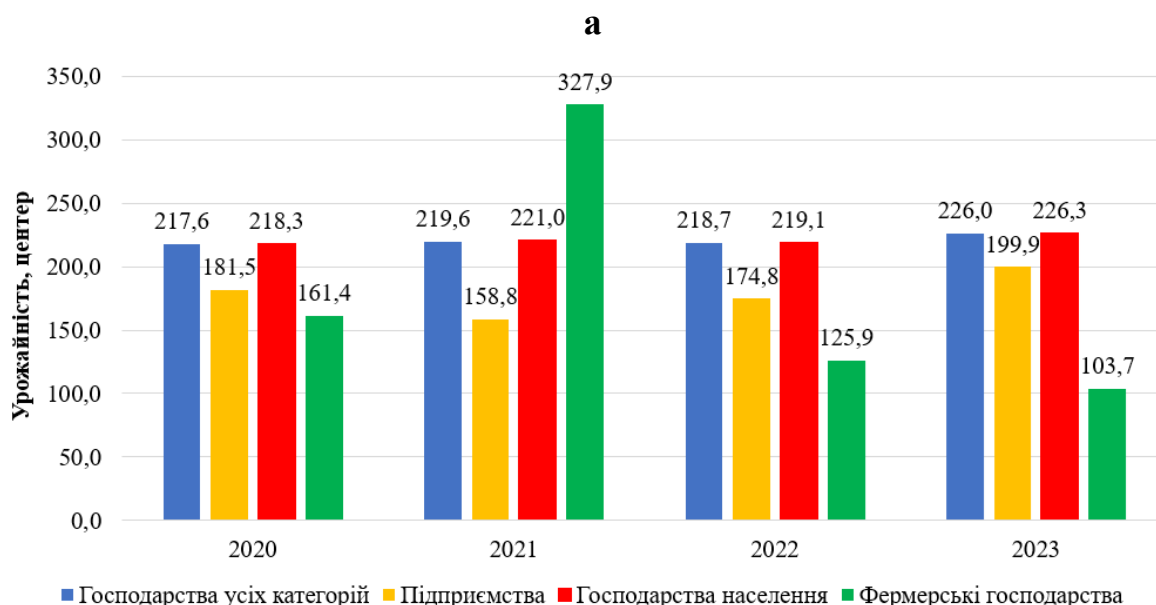
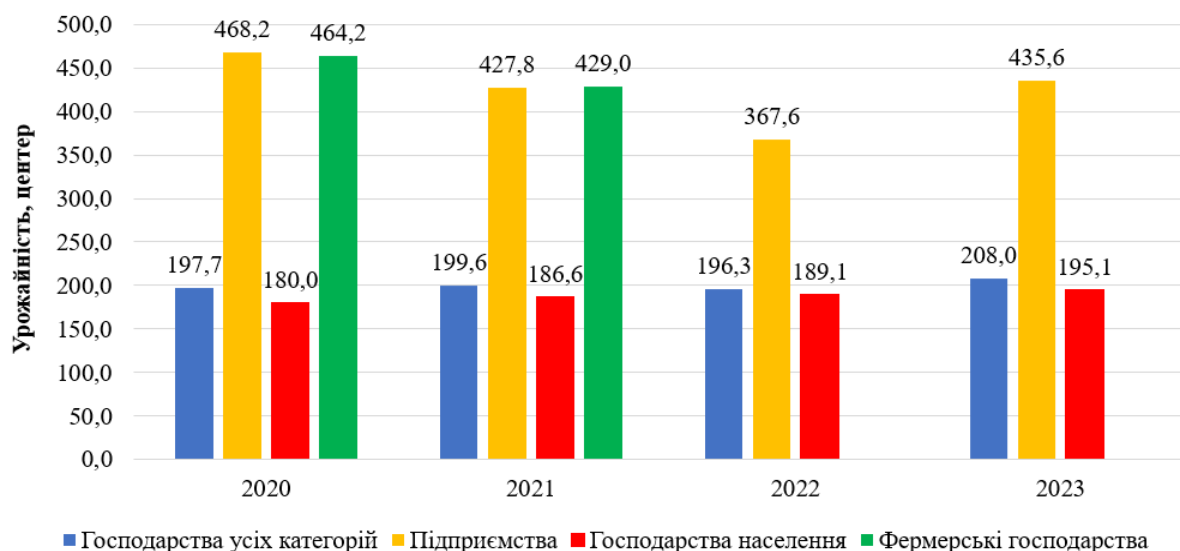
Найбільш поширеними представниками каротиноїдів в Україні є гарбуз, морква, солодкий перець, томати, щавель, диня, абрикоси, сливи, персики, смородина, чорниця, шпинат та агрус [43].

Морква та гарбуз є одними із найбільш традиційних та доступних джерел каротиноїдів в раціоні харчування населення України [44]. Вони відрізняються високим вмістом та добрим зберіганням каротиноїдів протягом довгого часу.

На рисунку 1.2 представлені динаміки урожайності моркви та гарбуза в Україні у різних видах господарств [45]. Як видно з рис 1.2 (а) урожайність моркви з 2020 до 2021 почала падати. З війною у 2022 році урожайність зменшилась у 1,3 рази порівняно з 2021 роком. У 2023 році спостерігається позитивна динаміка зростання порівняно з попередніми роками, а саме 2021 та 2022. При цьому з початком війни отриманих по урожаю моркви у 2022 та 2023 році стало складніше.

Урожайність гарбуза знаходиться протягом 2020 – 2022 років знаходиться на одному рівні, при цьому у 2023 році спостерігається не велике зростання (рис. 1.2

(б). Урожайність гарбуза на фермерських господарствах найбільше було у 2021 році і становило 327,9 центнерів, у подальші роки чого пішло падіння.

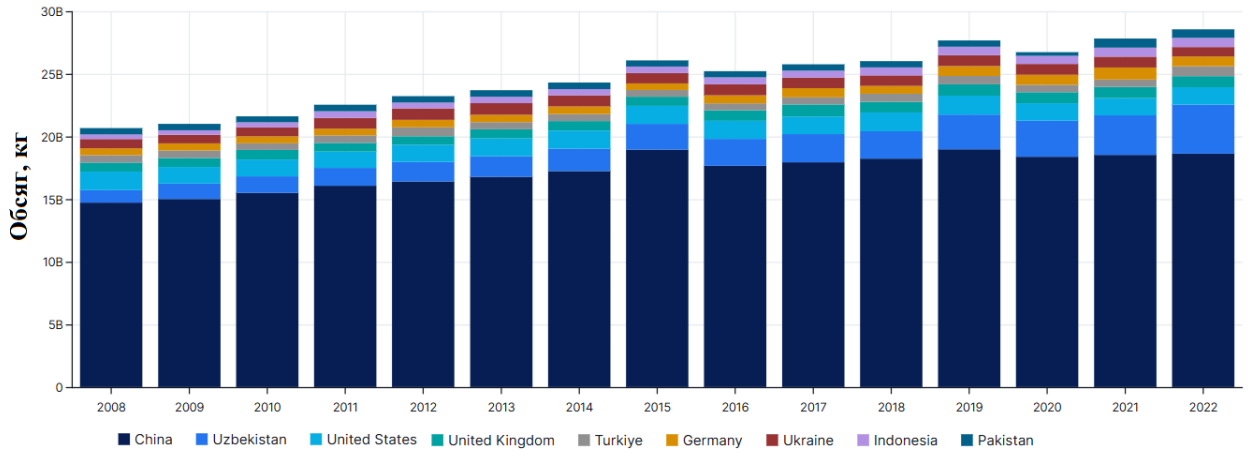


**б**

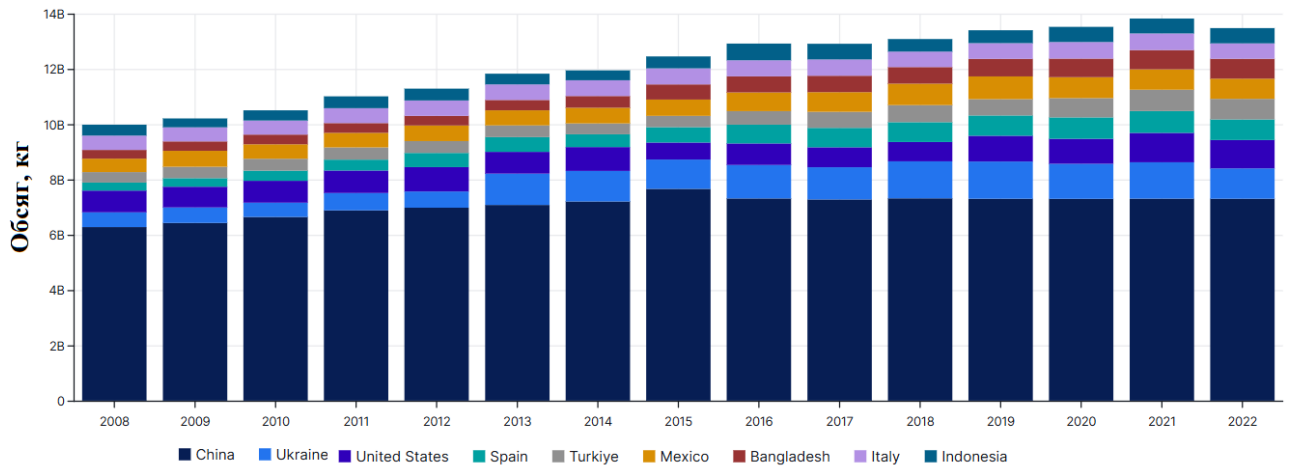
Рис. 1.2. Динаміка урожайності овочів в Україні, центнер [45]:

а – морква; б – гарбуз

Тенденції світового виробництва моркви та гарбуза з 2008 року по 2022 рік представлені на рис. 1.3 [46, 47]. Як видно з рис. 1.3., що виробництво у світі цих овочів у світі зростає, а найбільшим лідером є Китай. За даними [46, 47] виробництво Китаєм овочів у 2022 році (рис. 1.4.), а саме моркви становить 18580 тис.тон та гарбуза 7330 тис.тон.



а



б

Рис. 1.3. Тенденції виробництва овочів у світі з 2008 по 2022 рік [46, 47]:

а – морква; б – гарбуз

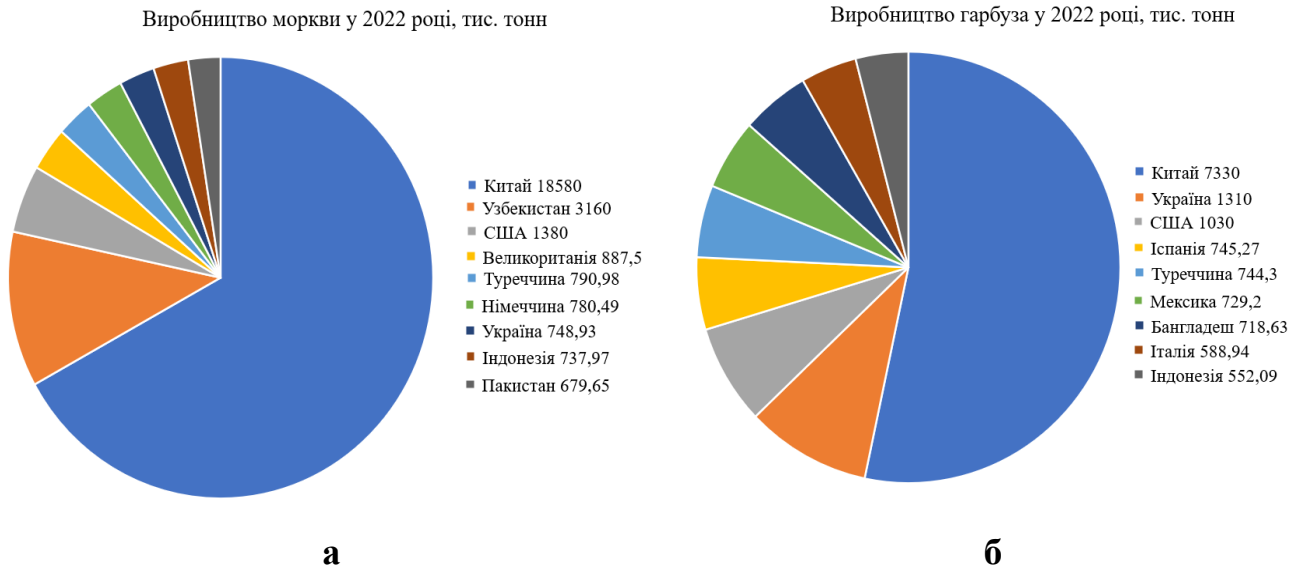


Рис. 1.4. Світове виробництво моркви (а) та гарбуза (б) за 2022 рік [46, 47]

При цьому за цими даними [46, 47] у 2022 році Україна займає 7 місце по виробництву моркви та 2 місце по виробництву гарбузів (рис. 1.4). Загальне виробництво моркви у світі за 2022 рік становило близько 78920 тисяч тонн, а гарбуза – 29450 тисяч тонн [46, 47].

Морква (*Daucus carota L.*) – коренеплід, що має значну економічну та харчову цінності, широко культивується в усьому світі через багатий вміст вітамінів, мінералів, клітковини та антиоксидантів. Морква відіграє вирішальну роль у раціоні людини, забезпечуючи її необхідними поживними речовинами, такими як бета-каротин, що перетворюється на вітамін А, який має вирішальне значення для зору, імунної функції та здоров'я шкіри [9].

До складу коренеплодів моркви, крім каротину, входять інші жиророзчинні вітаміни (Д, Е, К), значна кількість водорозчинних вітамінів В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, РР, С, а також біологічно активні речовини: стиролі, лейцин, ферменти, що ще більш підвищує її харчову цінність [44, 48, 49].

Гарбуз (*Cucurbita*) є загальною назвою сезонних плодів даного роду. Попит на гарбуз зростає з кожним роком, головним чином тому, що він менш калорійний зі значним вмістом харчових волокон, полісахаридів, пектинів, каротиноїдів і флавоноїдних пігментів, які набувають все більшого значення завдяки своїй антиоксидантній активності, мінералів (калій, кальцій, магній, натрій, залізо), вітамінів (А, С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>9</sub>) та інших речовин, що сприяють зміцненню здоров'я [5 – 7]. Найважливішою перевагою гарбуза є його низька калорійність, що пов'язано, насамперед, з високим вмістом води, яка становить приблизно 80% від загальної кількості в рослині [8].

Гарбуз та морква відносяться до сезонних продуктів та мають терміни зберігання, які можливо збільшувати завдяки консервуванню, а саме сушінню.

## **1.2. Огляд існуючих способів сушіння каротиновмісної рослинної сировини**

Великий внесок у розвиток енергоефективних процесів сушіння рослинної сировини зробили такі відомі вчені як: А. А. Долінський, Ю. Ф. Снежкін, Ж.О.

Петрова, О.А. Кремньов, М.І. Похожих, В.М. Атаманюк, А.О. Пак, О.Г. Бурдо та інші.

Сушіння є одним із найстаріших, природним і доцільним способом консервування завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах [3 – 11, 33].

Сушіння є необхідним для багатьох галузей промисловості, таких як харчова, фармацевтична, паперова та целюлозна [50]. Водночас він є енергоємним і може споживати до 20% енергії виробничого процесу [51]. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), у 2019 році на викопне паливо припадало понад 81% виробництва енергії. Широке використання викопного палива призводить до забруднення повітря та викидів парникових газів. З цієї причини оптимізація процесу сушіння має вирішальне значення, оскільки вона зменшує потреби в енергії та сприяє екологічній стійкості шляхом зменшення вуглецевих слідів, пов'язаних із промисловим сушінням [50].

Дослідженням процесів сушіння моркви та гарбузу з метою зниження енергозатрат і максимальним збереженням каротинів в кінцевому продукті, займаються як у світі, так і в Україні. Дослідженням процесу сушіння моркви та гарбузу займаються у таких країнах як Україна, Тайланд, Польща, Індія, Китай, Туреччина, Алжир та інші [50, 51 – 59].

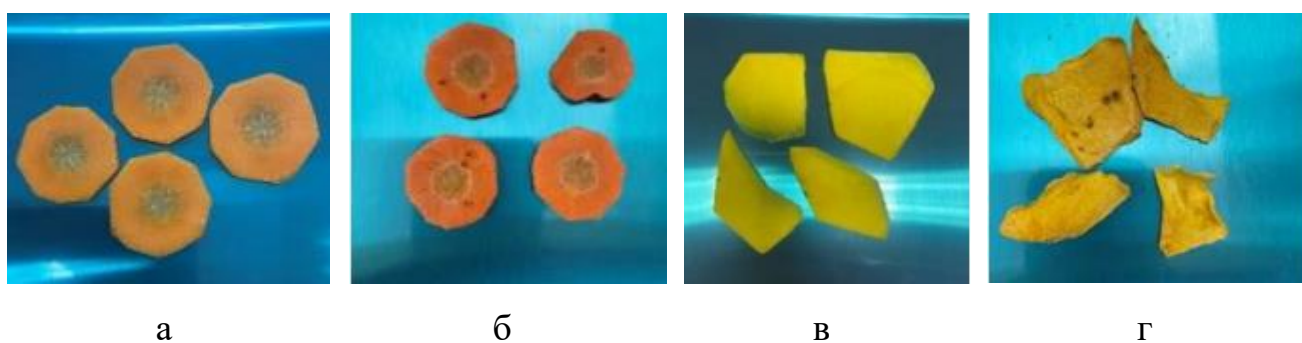


Рис. 1.5. Досліджувані матеріали до та після сушіння [52]:

а – морква до сушіння; б – морква після 3-х годин сушіння; в – гарбуз до сушіння;  
г – гарбуз після 3-х годин сушіння

Авторами [52] у роботі розглянуто сушіння гарбуза та моркви у гібридній сушарці, яка використовує теплову енергію від сонячного випромінювання та гаря-

чу воду, як підігрів дна камери.

Сушіння проводили за температур 50, 60, та 70 °С, при цьому середній час сушіння становить 6 годин на день. На рис.1.5 представлені до та після сушіння протягом 3-х годин. Ця технологія доцільна при сушінні в тропічному та субтропічному кліматі та за допомогою цього методу можна ефективно вирішити проблему сушіння в сезон дощів.

У роботі [53] розглянуто особливості сушіння та фізичні властивості шматочків гарбуза під час вібраційно-інфрачервоного, інфрачервоного та конвективного сушіння. Для досліджень були вибрані тайські гарбузи (*Cucurbita moschata*), які нарізали прямокутної форми розміром 2 см x 2 см x 0,5 см. При вібраційно-інфрачервоному та інфрачервоному сушінні для експериментів використовували різну інтенсивність інфрачервоного випромінювання 500Вт/м<sup>2</sup>, 750Вт/м<sup>2</sup> і 1000 Вт/м<sup>2</sup>.

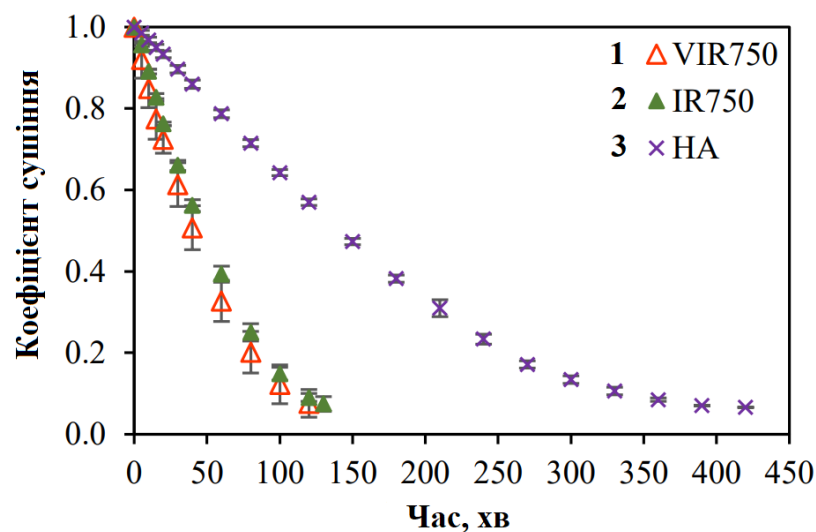


Рис. 1.6. Криві сушіння гарбуза за різних умов [53]: 1 – вібраційно-інфрачервоне (VIR) з вібрацією зі швидкістю 750 об/хв; 2 – інфрачервоне (IR) з інтенсивністю випромінювання 750 Вт/м<sup>2</sup>; 3 – конвективне сушіння (НА) при температурі теплоносія 60°C і швидкістю 0,5 м/с

Сушіння за допомогою вібраційно-інфрачервоного використовувало вібрацію зі швидкістю 750 об/хв, що є мінімально необхідним для перевертання шматочків гарбуза при рівномірному сушінні. Метод конвективного сушіння відбувався при температурі теплоносія 60°C і швидкістю 0,5 м/с. Метод

інфрачервоного сушіння з інтенсивністю випромінювання  $750 \text{ Вт/м}^2$ . Результати дослідження кінетики сушіння за даними методами представлені на рис. 1.6.

Спосіб вібраційно-інфрачервоного сушіння продемонструвало найвищу швидкість сушіння ( $0,1 \text{ г води/г сухої речовини} \cdot \text{хв}$ ) і найкоротший час сушіння ( $100 \text{ хв}$ ), при цьому ефективність сушіння залежала від інтенсивності інфрачервоного сушіння. Скибочки гарбуза, висушені в умовах вібраційно-інфрачервоного сушіння при середній інтенсивності ІЧ-променів  $750 \text{ Вт/м}^2$ , продемонстрували чудові властивості продукту. При цьому конвективне сушіння при низькій швидкості теплоносія має найнижчу тривалість процесу і становить  $425 \text{ хв}$ .

Таблиця 1.1. Параметри сушіння [54]

№	Спосіб	Параметри повітря			Потужність випромінювання (Вт)	
		Температура, °C	Швидкість, м/с	Відносна вологість повітря, %	Ультразвук	Мікрохвилі
1	конвективний (CV)	60	0,2	7	0	0
2	конвективно-ультразвуковий (CVUS)				200	0
3	конвективно-мікрохвильовий (CVMW)				0	100
4	конвективний з мікрохвилями та ультразвуком (CVMWUS)				200	100

Авторами у роботі [54] виконані дослідження конвективне ротаційне та гібридно-ротаційного сушіння моркви (сорт Nantes) за допомогою мікрохвиль та ультразвуку за допомогою гібридної ротаційної сушарки. Моркву промивали, очищали від шкірки та нарізали скибочками (товщиною  $5 \text{ мм}$ ) за допомогою промислового кутера Hällde RG100 (Kista, Швеція). Було виконано 4 способами — конвективне сушіння (CV), конвективне сушіння за допомогою ультразвуку

(CVUS), конвективне сушіння за допомогою мікрохвиль (CVMW) і конвективне сушіння за допомогою мікрохвиль та ультразвуку (CVMWUS). Дослідження оцінювало кінетику сушіння, споживання енергії та якість продукту. У таблиці 1.1 представлені режими способів, за якими досліджувалися зразки.

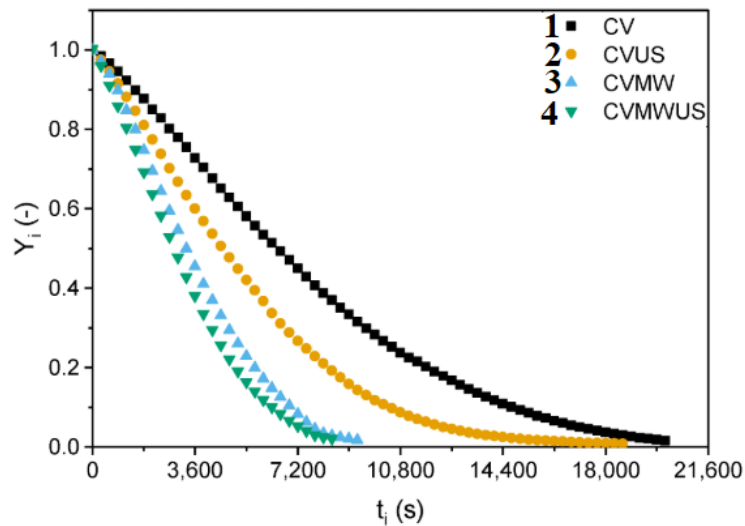


Рис. 1.7. Зміна безрозмірного вмісту води ( $Y_i$ ) від часу при сушінні за різними способами [54]: 1 – конвективний (CV); 2 – конвективно-ультразвуковий (CVUS); 3 – конвективно-мікрохвильовий (CVMW); конвективний з мікрохвилями та ультразвуком (CVMWUS)

На рис.1.7 представлена кінетика сушіння моркви за 4 способами. Як видно конвективне сушіння має меншу тривалість сушіння серед випробуваних способів. Однак застосування мікрохвиль (MW) або ультразвуку (US) значно скорочує час сушіння за рахунок збільшення швидкості сушіння.

Використання ультразвуку збільшило швидкість сушіння на 13%, мікрохвиль на 112%, а мікрохвиль і ультразвуку разом на 140%. Використання мікрохвиль зменшило споживання енергії на 30%, тоді як ультразвук призвело до незначного збільшення. Усі процеси призвели до значного зниження активності води. Ультразвук зменшив індекс різниці кольорів, тоді як мікрохвилі збільшили його порівняно з конвективним сушінням.

У роботі [55] було виконано дослідження якості зневоднених шматочків моркви та гарбуза, отриманих шляхом комбінованого сушіння з використанням

часткового сублімаційного сушіння та сушіння гарячим повітрям. Загальний вміст каротиноїдів у двох овочах зазнав значного впливу параметрів сушіння. Деструкція каротиноїдів при зберіганні при різних температурах була меншою у зразках комбінованого сушіння. Овочі висушені ковективно показали усадку, затвердіння та погану регідратацію (25 та 28 хв у холодній воді, коефіцієнт регідратації 1:2,6 та 1:2,9 відповідно). Час сушіння та загальна енергія для обробки комбінованого сушіння були на 50% меншими, ніж для ліофілізованого, але подібні до висушених гарячим повітрям. Комбінований процес зневоднення є ефективним для отримання високоякісних сушених овочів.

У роботі [56] досліджено характеристики сушіння моркви за різних форм сполучення повітряного потоку та високовольтних електричних полів (паралельний потік (PF) та перехресний потік (CF)) з використанням комбінованого сушіння з тепловим насосом та електрогідродинамікою (ЕНД).

Для досліджень використана морква, яку нарізали на скибочки. Сушіння моркви проводиться досягає до вологості 8 %. Експериментальний метод був однофакторним експериментом зі змінними, такими як температура (50, 60 і 70 °C), напруги (0, 25, 50, 75 і 100 кВ) і схеми повітряного потоку (паралельний потік (PF) та перехресний потік (CF)). Криві характеристик сушіння теплового насоса та теплового насоса-ЕНД за різних умов сушіння показані на рис. 1.8.

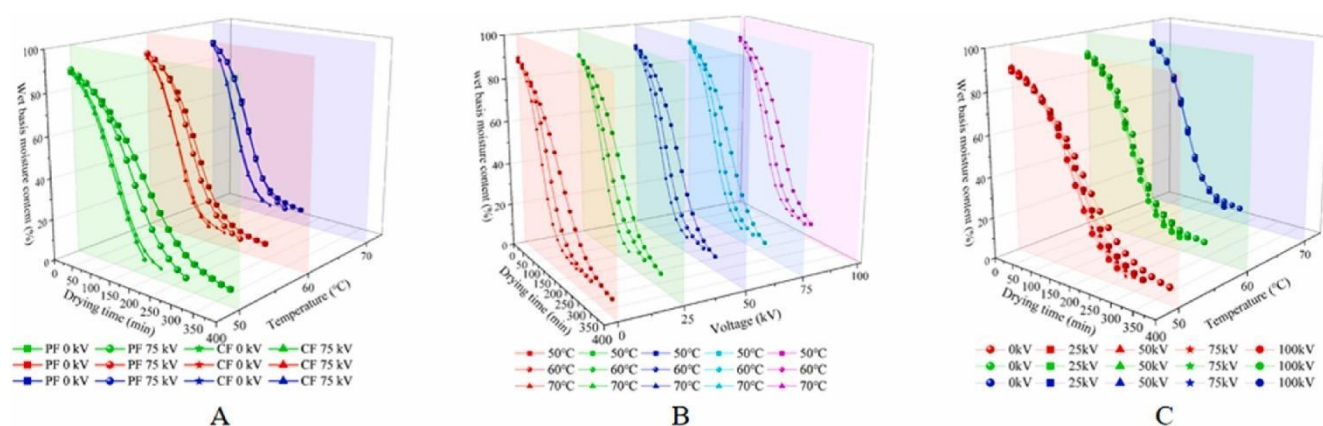


Рис. 1.8. Залежності основної вологості (WBM) від часу за різних умов сушіння [56]: А – при різних схемах повітряного потоку; В – при різних напругах; С – при різних температурах

Порівняно з сушінням одним тепловим насосом комбіноване сушіння тепловим насосом-електрогідродинамікою у режимі паралельний потік (PF) скорочує час сушіння моркви на 13,33 %–31,58 %, збільшує ефективний коефіцієнт дифузії вологи на 17,80 %–32,32 %, зменшує енергію активації сушіння на 3,66 %–47,78 %, збільшує питому швидкість вилучення вологи на 12,25 %–34,26 % і зменшує питоме споживання енергії на 12,01 %–24,22 %. У той час як комбіноване сушіння тепловим насосом і електрогідродинамікою у режимі перехресний потік (CF) скорочує час сушіння моркви на 12,5 %–18,18 %, збільшує ефективний коефіцієнт дифузії вологи на 7,27 %–13,14 %, зменшує енергію активації сушіння на 16,52 %, збільшує питому швидкість вилучення вологи на 4,64 %–12,58 % і зменшує питоме споживання енергії на 6,03 %–12,55 %. Покращення параметрів у режимі PF є вищими, ніж у режимі CF за тих самих умов.

Один із методів переробки каротиновмістних матеріалів, таких як морква та гарбуз, є сушіння на їх основі цукатів. У роботах [57, 58]. Але при цьому цей процес складніший і більш енергоємний, ніж переробка сировини на чипси чи порошки.

У роботі [59] розглянуто інфрачервоне сушіння моркви. Експерименти виконували з використанням трьох рівнів потужності інфрачервоного випромінювання (300, 400 та 500 Вт) та при швидкостях повітря (1,0, 1,5 та 2,0 м/с). Скибочки моркви сушили від початкової вологості 8,52 кг води/кг сухої речовини до 0,11 кг води/кг сухої речовини.

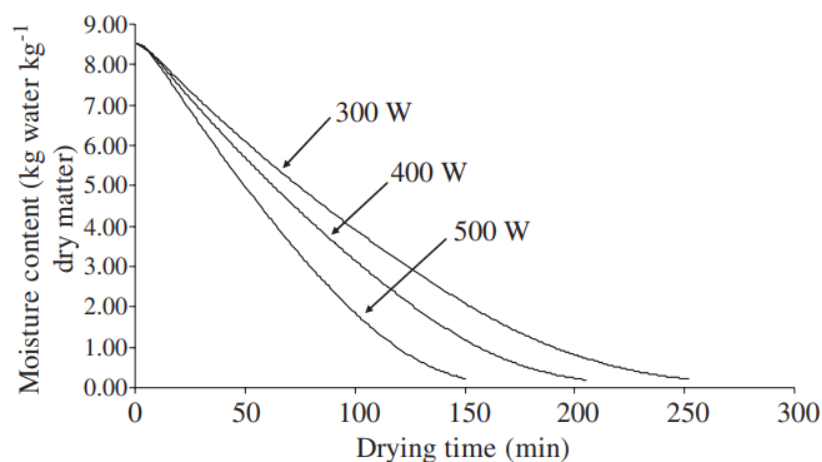


Рис. 1.9. Криві сушіння скибочок моркви при різній потужності інфрачервоного випромінювання при швидкості повітря 1,0 м/с [59]

На рисунку 1.9 зображені криві сушіння скибочок моркви при різній потужності інфрачервоного випромінювання при швидкості повітря 1,0 м/с. Час сушіння при потужності інфрачервоного випромінювання 300, 400 та 500 Вт становив 252, 205 155 хв. Швидкість сушіння збільшувалася зі збільшенням потужності інфрачервоного випромінювання.

Авторами у роботі [60] розглянуто впливу чотирьох процесів сушіння (сушіння повітряним потоком (AFD), сублімаційне сушіння (FD), вакуумне багаторазове сушіння (VMFD) та сушіння набуханням (SD) у поєднанні з миттєвим контрольованим падінням тиску (DIC) зі стандартним потоком повітря) на біохімічні, фізико-хімічні, термохімічні та біологічні властивості порошоків гарбуза потімаррону (*Cucurbita maxima*). Основні результати показали, що доступність біологічно активних речовин набагато більше пов'язана з процесом сушіння та пояснюється пористістю.

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Ж.О. розроблені способи отримання каротиновмісних порошоків, з моркви та гарбуза [27, 44]. Сушіння гарбуза полягає у створенні ступеневих режимів, а саме конвективного 120/80 °C та конвективно-вакуумного сушіння 120/80 °C (тиск повітря в камері 0,01...0,015 МПа для досушування матеріалу) [44]. Застосування ступеневих режимів сушіння дозволить зберігати колір і корисні елементи. При сушінні моркви були створені композитні матеріали, з додаванням до неї білкововмісної сировини (квасоля, овес та інші) [27, 44]. Ці композиції створені через те що каротиноїди найкраще перетворюються у ретинол тоді, коли в раціоні харчування є достатня кількість легко засвоюваного білку та жиру. За розробленою технологією у квасолево-морквяній каротиноїди збережені близько 94,6% та у овесно-морквяній – 95,7% при конвективному сушіння за температури 70 °C та швидкості теплоносія 3,5 м/с [27].

З огляду способів сушіння моркви та гарбуза з метою збереження  $\beta$ -каротин та впливає, що отримання натуральних порошоків на їх основі потребує подальших досліджень.

### 1.3. Види сушильного обладнання для сушіння картопиновмісної рослинної сировини

При переробці рослинної сировини сушінням використовують різного виду сушарки, такі як камерні, тунельні, стрічкові, сублімаційні, сонячні та інші. Також розповсюдженням комбінованого сушіння у світі створюються комбіновані сушарки.

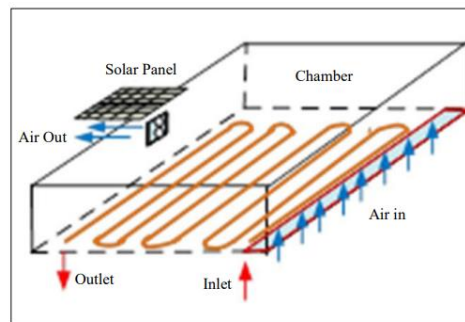
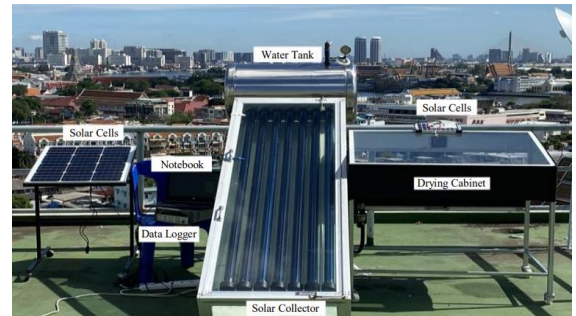
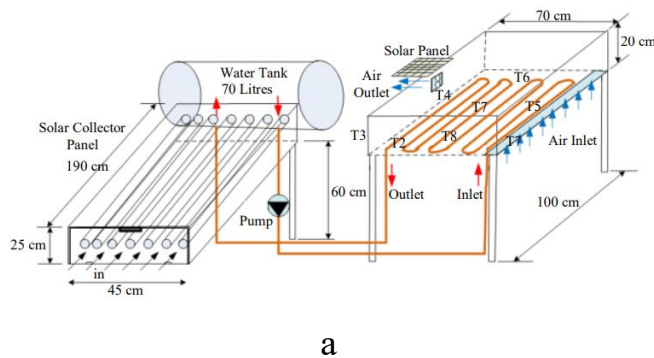


Рис 1.10. Інноваційна гібридна система сушіння [52]: а – схема гібридної сушарки; б – фото гібридної сушарки; в – сушильна камера

Сушарка з комбінованим використанням теплової енергії або гібридна сушарка (рис. 1.10) використовує сонячне світло та гарячу воду. Сушильна камера нагрівається за допомогою гарячої води, що зберігається в резервуарі для води. Тепло випромінюється шляхом розміщення імпульсних мідних нагрівальних труб у сушильній камері, як показано на рисунку 1.10 в [52].

Сушарку, розроблену авторами [52], складають три компоненти:

- 1) комбінована сушарка з використанням сонячного випромінювання,
- 2) конструкція сонячних резервуарів для гарячої води,

### 3) конструкція схем керування.

Гібридна сушарка, яка поєднує сонячне випромінювання та нагрівання гарячою водою, може підвищити температуру в сушильній камері всього за дві хвилини та підтримувати її понад годину. Цей метод може ефективно вирішити проблему сушіння продуктів під теплим сонячним світлом або під час сезону дощів.

Ротаційна гібридна сушарка, сконструйованої PROMIS-TECH (Вроцлав, Польща), яку схематично представлено на рисунку 1.11 [54].

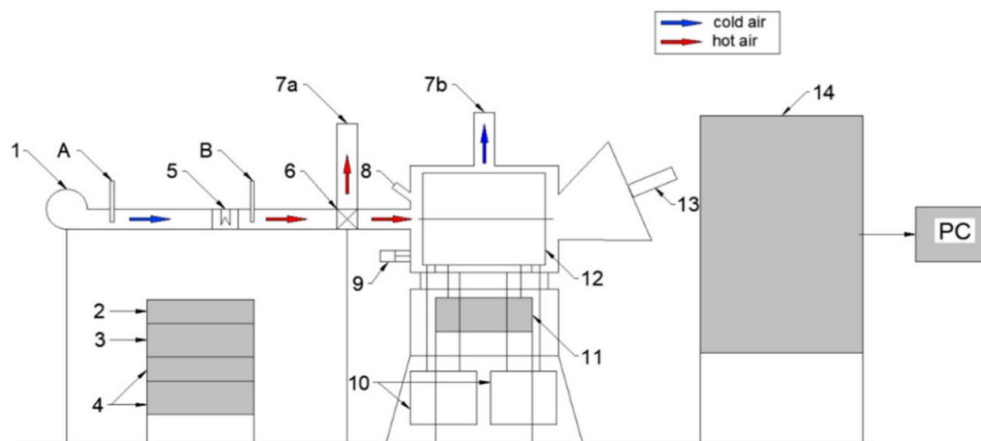


Рис. 1.11. Схема ротаційної гібридної сушарки [54]: 1 – вентилятор; 2 – контролер повітряно-ультразвукової системи (ПУС); 3 – підсилювач АУС; 4 – мікрохвильові живильники; 5 – нагрівач; 6 – пневматичний клапан; 7a і 7b – вихідний клапан повітря; 8 – пірометр; 9 – привід барабана, 10 – мікрохвильові генератори; 11 – ваги; 12 – обертовий барабан; 13 – датчик АУС; 14 – блок керування; А – датчик температури і вологості; В – датчик температури

Сушарка має два різних способи сушіння: конвективний (CV) і мікрохвильовий (MW). Конвективне сушіння використовує повітря, що всмоктується вентилятором (рис. 1.11 (1)) із середовища сушарки, яке після проходження через нагрівач (5) надходить безпосередньо в сушильний барабан (12). Пройшовши через барабан, зволене повітря виходить із сушарки через вихідний канал (7b). Сушіння за мікрохвильовим способом здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль на частоті 2,45 ГГц, які безперервно

генеруються двома охолоджуваними водою магнетронами (10), виробництва Muegge (Райхельсхайм, Німеччина). Крім того, кожна з технік сушіння може підтримуватися ультразвуком високої потужності (УЗ), який генерується перетворювачем, встановленим збоку сушарки (13), і подається через повітря безпосередньо до матеріалу. Робота датчика контролюється двома іншими блоками бортової ультразвукової системи (AUS), зокрема контролером (2) і попереднім підсилювачем (3). Система розроблена та виготовлена компанією Pisonics (Мадрид, Іспанія) [54].

Застосування мікрохвиль та/або ультразвуку під час конвективного сушіння матеріалів позитивно впливає на кінетику сушіння. Гібридні процеси продемонстрували вищі швидкості сушіння, що призвело до коротшого часу сушіння.



Рис. 1.12. Промислова установка для сублімації продуктів [67]

Ліофілізаційне або сублімаційне 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 [61 – 66]. На рисунку 1.12 представлена промислова сублімаційна сушильна установка FD-50R 500Kgs Food Freeze Dryer, Китай. Сублімаційна сушарка FD-50R підходить для масового виробництва на промислових підприємствах, номінальна ємність партії 500 кг і цикл сушіння не більше 24 годин. Але за рахунок тривалого сушіння, такі

сушарки мають великі енерговитрати.

На рисунку 1.13 представлена загальна схема комбінованого інфрачервоного та конвективного сушильного обладнання на основі контролю температури та вологості [68]. Сушарка зроблена з нержавіючої сталі всередині та зовні.

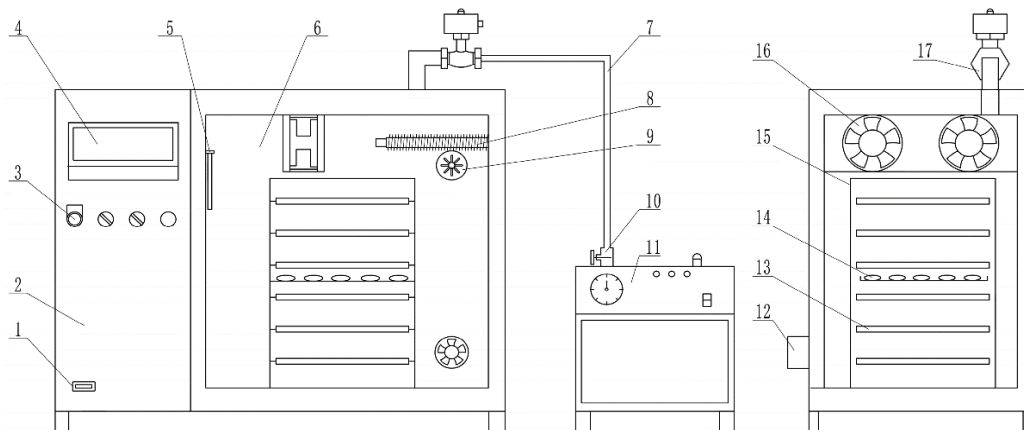


Рис. 1.13. Принципова схема комбінованої сушарки інфрачервоного та конвективного сушіння [68]: 1 – інтерфейс USB; 2 – корпус управління; 3 – індикатор; 4 – людино-машинний інтерфейс; 5 – датчик температури та вологості; 6 – сушильна камера; 7 – зволожувальна труба; 8 – електронагрівальна труба; 9 – вхідний отвір для повітря; 10 – паровий клапан; 11 – парогенератор; 12 – витяжний вентилятор; 13 –інфрачервоний варіант обігріву; 14 – досліджуваний матеріал; 15 – візок; 16 – осьовий вентилятор; 17 – електромагнітний клапан

Сушарка працює наступним чином, за допомогою інтерфейсу людина–комп’ютер (4) відбувається контроль температури та вологості у сушильній камері. Він також активує електричну нагрівальну плиту інфрачервоного випромінювання з вуглецевого волокна. Повітря надходить у повітропровід із правого заднього повітрязбірника, нагрівається електричною нагрівальною трубкою та виходить із повітропроводу через повітропровід з лівого боку лотка для матеріалу, надходячи в сушильну камеру. Інфрачервона радіаційна пластина з вуглецевого волокна лотка для матеріалу нагріває матеріал, випускаючи інфрачервоне випромінювання. Потік повітря повертається в повітророзподільну камеру через повітряний вихід з правого боку після того, як матеріал і повітряний потік успішно обмінялися теплом.

Вентилятор забезпечує рекуперацію відпрацьованого тепла та знижує споживання енергії сушильним пристроєм, обертаючи гаряче повітря в повітропроводі у вентилятор для додаткового нагріву. Між електричною нагрівальною пластиною з інфрачервоним випромінюванням із вуглецевого волокна та лотком був зазор у 30 мм [68].

Для сушіння також використовуються комбіновані інфрачервоно-мікрохвильові сушарки. Мікрохвилі - це електромагнітні хвилі з довжиною від 1 м до 1 мм та частотою від 300 МГц до 300 ГГц [69 – 71]. Найвища поширена мікрохвильова частота, що використовується для промислових цілей у більшості країн, становить 915 МГц, а частота, що використовується для комерційних, побутових та промислових цілей, становить 2450 МГц [69, 72].

Мікрохвильове сушіння має багато переваг порівняно з традиційними методами сушіння, включаючи високу швидкість зневоднення [69, 73] та можливість отримання точного конденсату [69, 74]. Оптимальна щільність потужності, температура повітря та швидкість становили 0,30 Вт/г, 89,9°C та 0,50 м/с відповідно, з питомою витратою енергії 0,02 МДж/кг та часом сушіння 10,3 хв.

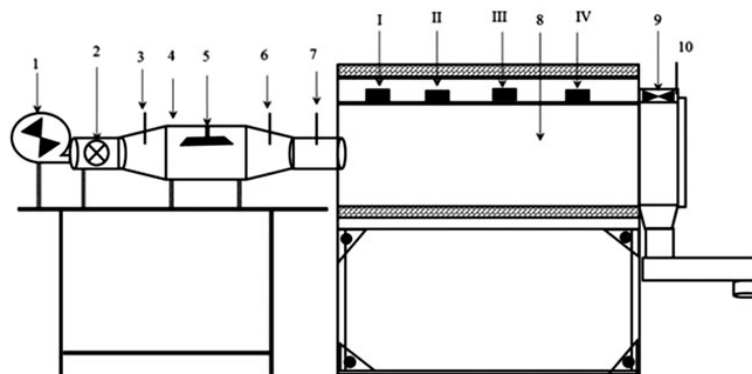


Рисунок 1.14 – Принципова схема комбінованої інфрачервоно-мікрохвильової сушарки для гарячого повітря [75]: 1 – вентилятор; 2 – клапан регулювання повітряного потоку; 3 - датчик температури вхідного повітря (термопара типу К); 4 – камера повітряного нагріву; 5 – ІЧ лампа (ІЧ лампа FSC , 1000 Вт, 230 В) для нагрівання повітря; 6 – датчик температури на виході (термопара типу К); 7 – анемометр для вимірювання швидкості повітря; 8 – сушильна камера; 9 – витяжний вентилятор; 10 – датчик температури повітря та вологості на виході. I, II, III та IV - магнетрони (по 1 кВт кожен)

Існують методи комбінованого інфрачервоно-мікрохвильового сушіння. На рис. 1.14 представлена схема комбінованої інфрачервоно-мікрохвильової сушарки для гарячого повітря, яка дозволяє проводити нагрівання в два етапи [75]. Інфрачервоне сушіння гарячим повітрям зменшує споживання енергії порівняно з традиційними методами сушіння, зберігаючи при цьому якість продукту. Кінцевим етапом сушіння після гарячого повітря є мікрохвильове сушіння гарячим повітрям.

В Інституті технічної теплофізики НАН України (ІТТФ НАН України) розроблена камерна сушарка ( рис.1.15.) [76].

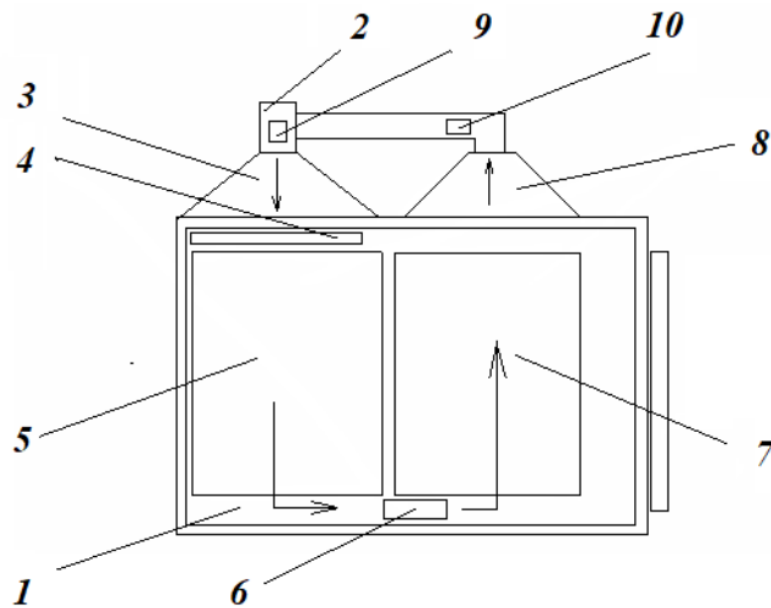


Рис. 1.15. Схема камерної сушарки [76]: 1 – камера; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – дифузор; 4 – перша батарея нагрівальних елементів; 5 – перший візок; 6 – друга батарея нагрівальних елементів; 7 – другий візок; 8 – конфузор; 9 – шибер; 10 – компенсуючий шибер

Вона складається із сушильної камери (1) в яку заїжджають два візки (5, 7). Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) на вході в сушильну камеру. Для нагріву теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4, 6). В середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологи та температури РКВТ – 2/16. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагенту в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря. Відцентровий вентилятор (2) нагнітає повітря через дифузор (3)

до першої батареї нагрівальних елементів (4), де воно нагрівається і потрапляє на перший візок (5). Після того як тепловий агент проходить перший візок, він насичується випареною вологою із матеріалу, та його температура знижується. Після першого візка тепловий агент потрапляє на другу батарею нагрівальних елементів (6), де догрівається та проходить другий візок (7) ще більше насичуючись випареною вологою із матеріалу, і його температура знижується.

Після другого візка тепловий агент насичений вологою через конфуззор (8) потрапляє до вентилятора (2) який нагнітає його знову в камеру, але перед цим через шибер (9) певна кількість відпрацьованого теплоносія виводиться за межі сушарки, через компенсуючий шибер (10), завдяки зоні розрідження, частково всмоктується свіже повітря. Таким чином сушильна установка працює з частковою рециркуляцією теплоносія. Якщо шибери (9,10) зачинені, то сушарка працює з повною рециркуляцією теплоносія.

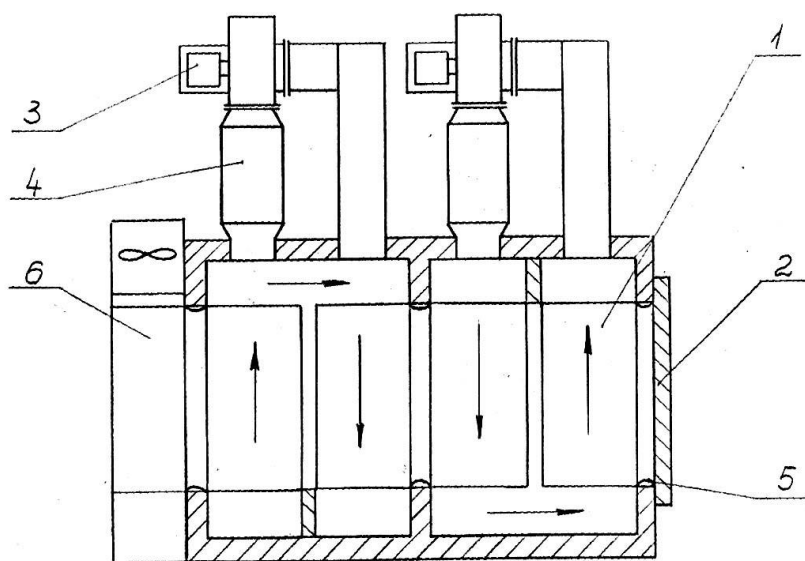


Рис. 1.16. Принципова схема двозонної сушильної установки [44]:

- 1 – візок; 2 – ворота сушарки; 3 – вентилятор сушарки; 4 – теплогенератор;  
5 – ущільнення; 6 – зона охолодження

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблена двозонна сушильна установка представлена на рис. 1.16 [44]. Данна установка дозволяє здійснювати необхідний режим сушіння, отримувати продукти високої якості при

високих техніко-економічних показниках. Корпус сушильної установки – тунель, який складається з двох сушильних зон. Кожна сушильна зона має дві напівзони, в яких на вогневих калориферах розміщується один візок. Сушарка виконана із збірних металевих секцій, які створюють зони. Всередині корпуса розміщений рейсовий шлях, замкнутий за тунелем, який має для маневрування візків поворотні круги. В торці корпуса із сторони завантажування встановлені підвісні одностулкові ворота (2), а на виході із сушарки воріт нема. Двері візка служать воротами на виході із сушарки [44].

Корпус сушарки оснащений боковими та сталевими лабіринтними ущільненнями (5) у вигляді гнучких теплостійких войлочних фартухів. Коли візок рухається з номінального положення по всій довжині сушарки, створюється лабіринтне ущільнення, яке разом з дверима візка зупиняє рух повітря вздовж установки та виводить його, забезпечуючи раціональну схему обдування візка. Стінка сушарки має два отвори, через які в сушильний тунель вставлені термометри опору, що дозволяє реєструвати температуру охолоджувальної води в кожній секції агрегату [44].

Нагріте повітря від теплогенератора (4) подається в зону сушіння за допомогою вентилятора, омиваючи сировину, розміщену на піддоні, справа наліво. Потім напрямок охолоджувальної води змінюється на  $180^\circ$  у просторі, утвореному стінками сушарки та боковинами візка, рівномірно розподіляючи її по висоті візка та обдуваючи стружку зліва направо. Після цього, теплоносій через бокові рециркуляційні канали (5) потрапляє до вентилятора. Частина використаного відпрацьованого теплоносія скидається, а натомість подається така ж кількість свіжого повітря. Отже, під час проходження візка через зону сушіння напрямок розпилення сировини змінюється, створюючи додаткові умови для рівномірного сушіння.

Теплонасосна сушарка, показана на рисунку 1.17, призначена для сушіння термолабільних матеріалів за допомогою теплонасосних циклів. Теплонасосні сушарки можна використовувати для сушіння різноманітних матеріалів

рослинного та тваринного походження, синтетичних матеріалів і виробів, лікарських трав та грибів, овочів, фруктів.

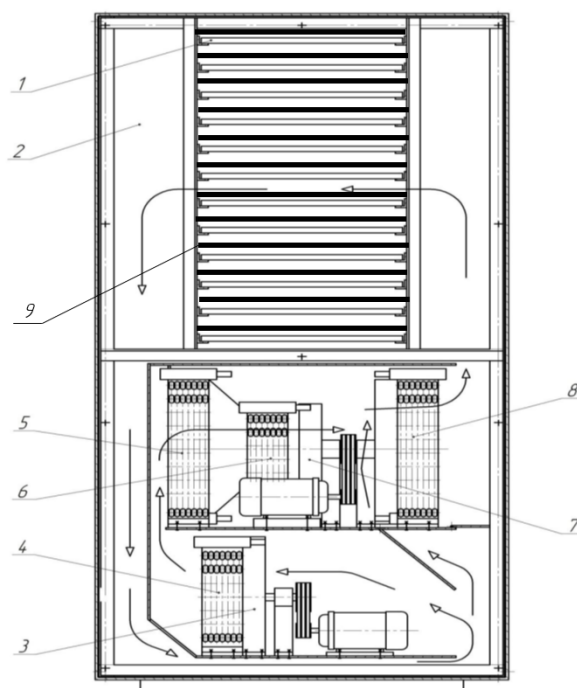


Рис. 1.17. Теплонасосна сушильна установка з інфрачервоними нагрівачами [77]:

- 1 – піддони; 2 – корпус сушильної шафи; 3 – циркуляційний вентилятор;  
 4 – атмосферний теплообмінник (нижній); 5 – випарник фреону;  
 6 – атмосферний теплообмінник (верхній); 7 – вентилятор; 8 – конденсатор фреону; 9 – інфрачервоні нагрівачі

Сушіння відбувається у замкнутому циркуляційному контурі з вимушеним осушенням сушильного агенту методом конденсації вологи і утилізації теплоти конденсації, яка використовується для випаровування холодильного агенту.

У сушарці з тепловим насосом матеріал, що підлягає зневодненню, розміщується на піддоні (1) (рис. 1.17) і транспортується до сушильної камери (2) (технологічний відсік), де циркулює гарячий сушильний агент [77]. Коли вмикаються циркуляційний вентилятор, тепловий насос та інфрачервоні лампи (9), сушильне повітря з температурою, встановленою на панелі керування, подається до технологічного відсіку, де воно проходить над матеріалом.

Проходячи над матеріалом, повітря нагріває та зневоднює його, змінюючи свій вміст вологи. Осушувач охолоджується та зволожується. Частина

використаного вологого сушильного агенту всмоктується в циркуляційний вентилятор (3). Потім він розділяється на два потоки: перший потік подається для змішування з осушеним повітрям, а другий потік подається до теплообмінника нижньої атмосфери (4), де він охолоджується за рахунок теплопередачі від фреону, що протікає по трубках. Охолоджене повітря потім потрапляє у випарник фреону (5) [77].

У випарнику сушильний агент охолоджується до температури точки роси, а конденсована волога видаляється з сушарки. Зневоднений та охолоджений сушильний агент потрапляє у верхній теплообмінник (6), де він конденсується та нагрівається до 20°C за рахунок охолоджувального тепла фреону. Після виходу з теплообмінника сушильний агент змішується з використаним осушувачем, а потім за допомогою вентилятора (7) подається до конденсатора фреону (8) та нагрівається до заданої кінцевої температури. Після виходу з конденсатора гарячий зневоднений осушувач повертається до сушильної камери [77].

Фреон циркулює між конденсатором і випарником. У випарнику пара фреону потрапляє в компресор і стискається. Під час процесу стиснення фреон нагрівається та потрапляє в конденсатор. У конденсаторі нагрітий фреон випромінює тепло в повітря, нагріваючи його, а сам фреон охолоджується та конденсується. Потім конденсований фреон повертається у випарник, де тепло передається від повітря до фреону, що призводить до його випаровування. Це охолоджує повітря та видаляє будь-яку конденсовану вологу [77].

Тобто, охолодження та зневоднення сушильного агенту у випарнику та нагрівання його в конденсаторі здійснюються за умов реалізації циклу теплового насоса в компресійній холодильній установці з додатковим інфрачервоним нагріванням, за допомогою якого використовується прихована теплота пари осушувача та його розрідження, що дозволяє значно зменшити енергоспоживання та скоротити процес сушіння, зберігаючи при цьому всі корисні властивості термічно нестабільного матеріалу [77].

По технічному рівню технологія і зразок сушарки відповідає сучасному світовому рівню розвитку техніки, а саме: енерговитрати, завантаженість об'єму

сушарки, теплообмінної поверхні і зняття готової продукції відповідають показникам такого ж типу сушарок, що виготовляються за кордоном. Джерелом енергії для роботи теплонасосної сушарки із комбінованим теплопідводом є електрика [77].

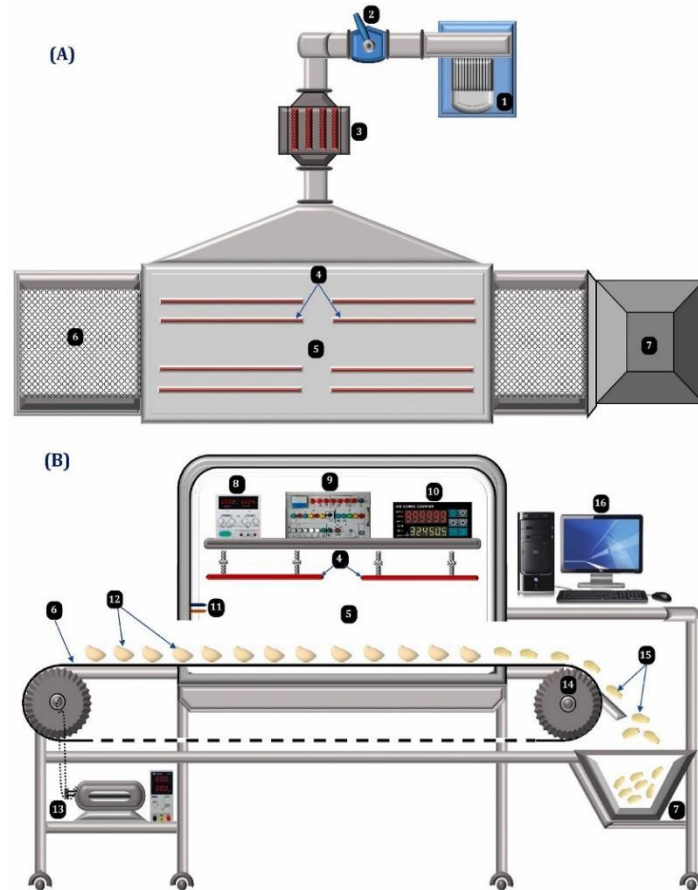


Рис. 1.18. Принципова схема розробленої стрічкової гібридної сушарки [78]: (А) вид зверху та (В) вид збоку: 1 – вентилятор; 2 – регулятор швидкості; 3 – електричний нагрівач; 4 – інфрачервоні нагрівачі; 5 – сушильна камера; 6 – конвеєрна стрічка; 7 – бункер для сухого матеріалу; 8 – регулятор напруги; 9 – блок управління; 10 – ватметр; 11 – датчик температури та швидкості; 12 – зразок матеріалу; 13 – електричний двигун; 14 – ведучий шків; 15 – сухі зразки; 16 – комп’ютер

У роботі [78] розглянуто стрічкову гібридну сушарку. Система нагріву гібридної сушарки складається з двох джерел, перше конвективне гаряче повітря та друге інфрачервоне випромінювання. Принципова схема сушарки наведена на рис. 1.18. Сушарка має габаритні розміри  $3 \times 8 \times 1,5$  м по довжині, ширині та висоті

відповідно. Сушарка складалася з сушильної камери з двома камерами однакового розміру  $0,8 \times 0,8$  м, виготовлених з листа нержавіючої сталі товщиною 2 мм. Зовнішня поверхня стін утеплена шаром азбесту (товщина 5 см). Система конвеєрної стрічки, виготовлена з дротяної сітки з нержавіючої сталі, з'єднує сушильні камери та використовується для транспортування зразка в сушильні камери та з них. Для забезпечення рівномірності умов сушіння в сушильній системі з обох кінців встановлено живильний пристрій і розвантажувальний бункер.

Конвективне нагрівання складається з двох електричних нагрівачів та вентилятора, який забезпечував бажану швидкість повітря для сушіння (0,2–3,0 м/с). Повітря проходило через полівінілхлоридну (ПВХ) трубу та потрапляло в сушильну камеру через два входні отвори. На вході ПВХ труби розташований регулювальний клапан для контролю кількості повітря, що надходить у сушильну камеру. Повітря нагрівається, проходячи через два спіральні електричні нагрівачі потужністю 1,5 кВт кожен. Ці електричні нагрівачі регулюються блоком керування для підтримки постійної температури під час сушіння.

У випадку системи інфрачервоного випромінювання (ІЧ) система оснащена інфрачервоними обігрівачами галогенними лампами (Philips, трубчастого типу) потужністю 1000 Вт діаметром і довжиною 0,6 см і 35,5 см відповідно. Інфрачервоний нагрівач має інтенсивність нагріву  $1500\text{--}6000$  Вт/м<sup>2</sup>, встановлений у верхній частині внутрішньої поверхні сушильних камер для забезпечення рівномірності. Інфрачервоні джерела тепла розташовувалися паралельно конвеєрній стрічці на відстані 15 см. Інтенсивність інфрачервоного випромінювання або вихідну потужність ламп можна було змінювати шляхом регулювання напруги за допомогою регулятора потужності. Ця гібридна сушильна машина дозволяє використовувати гаряче повітря та інфрачервоне нагрівання як окремо, так і одночасно, вимикаючи та вмикаючи дві системи нагріву. Температуру сушіння повітрям розраховували за допомогою термопар Т-типу, підключених до реєстратора даних з точністю ( $\pm 1$  °С). Швидкість висихання повітря в приміщенні сушильної камери оцінювали за допомогою гарячого дротяного анемометра з діапазоном 0,1–15 м/с.

#### 1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження

З вищенаведеного літературного огляду випливає, що відомі способи переробки каротиновмісної рослинної сировини характеризуються або високими енерговитратами та низькою продуктивністю, або низькою якістю отриманого продукту.

При переробці каротиновмісної сировини відомі методи здебільшого енергозатратні, і більшість не дають збереженню біологічно активних речовин. Конвективне сушіння є одним з кращих методів сушіння каротиновмісних матеріалів, але при цьому має переважно велику тривалість, яку для кращого збереження функціональних властивостей необхідно зменшувати за допомогою створення ступеневих або комбінованих режимів.

Тому **метою дисертаційної роботи** є інтенсифікація тепломасообміну та автоматичний контроль процесу сушіння каротиновмісної рослинної сировини

Для вирішення поставленої мети пропонуються наступні завдання:

- проаналізувати науково-технічну, патентну літературу за дослідженнями тепломасообмінних процесів при переробці каротиновмісної рослинної сировини;
- розробка режимів підготовки каротиновмісної сировини до сушіння;
- дослідити кінетику процесу сушіння та розробити енергоефективні режими зневоднення каротиновмісної рослинної сировини;
- розрахувати кінетику вологообміну досліджуваної каротиновмісної рослинної сировини;
- визначити втрати каротиноїдів в матеріалі після сушіння;
- оснащення існуючої сушарки системою, яка забезпечує автоматично повний цикл контролю процесу сушіння;
- розробити енергоефективну теплотехнологію отримання каротиновмісних порошоків.

## РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Матеріали досліджень

Основним об'єктом дослідження була каротиновмісна сировина, а саме морква та гарбуз, що представляють собою колоїдні капілярно-пористі тіла, в якому мають місце всі характерні форми зв'язку вологи з матеріалом.

Морква (*Daucus carota* L.) — дворічна трав'яниста рослина родини Аріасеае [79]. Це один з найпопулярніших коренеплодів, який вирощують у всьому світі [80]. Відома своєю високою харчовою цінністю та чудовими властивостями зберігання, що відіграє вирішальну роль у раціоні багатьох індустриальних західних країн [81].

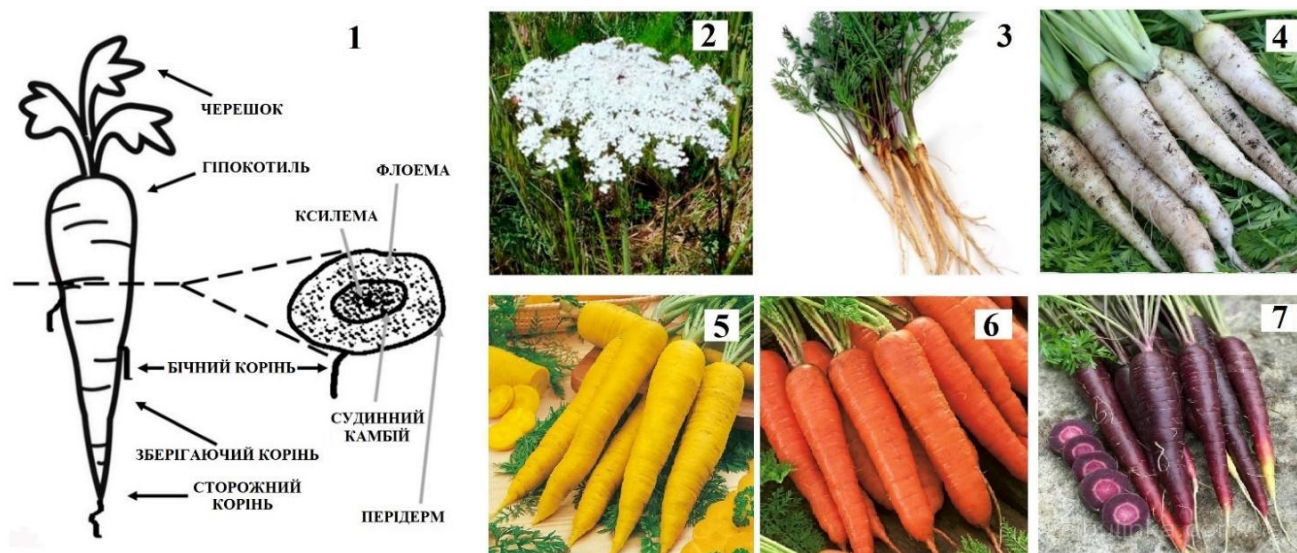


Рис. 2.1. Морква (*Daucus Carota* L) [80]: 1 – схематичне зображення *Daucus Carota* L.; 2 – білі квіти моркви; 3 – *D. Carota* subsp. *Carota* (дика морква); 4 – *D. Carota* subsp. *Sativus* (домашня біла морква); 5 – *D. Carota* subsp. *Sativus* (домашня жовта морква); 6 – *D. Carota* subsp. *Sativus* (домашня помаранчева морква); 7 – *D. Carota* subsp. *Sativus* (домашня фіолетова морква).

На рис. 2.1 представлена схематичне зображення моркви *Daucus Carota* L., де показано різні частини: черешок, гіпокотиль і корінь, а також його поперечний розріз, де представлені флоема та ксилема. Коріння є найчастіше вживаною частиною моркви; вони значно розширені та солодкі, з гарною здатністю до зберігання. Корінь утворений шкіркою або перидермою, м'якушастою зовнішньою

корою або флоемою та внутрішньою серцевиною або ксилемою, як показано на рисунку 2.1 (1) [80].

Наведені на рис. 2.1. деякі відомі коренеплоди моркви, які мають широкий спектр кольорів, від білого до фіолетового (4 –7).

Їстівний коренеплод моркви добре відомий своїм багатим вмістом поживних речовин. Окрім води, вуглеводів, жирів, білків, морква також багата на різноманітні корисні мікроелементи та фітонутрієнти [82]. У моркві містяться наступні хімічні сполуки: вода – 86-88 г/100 г сухої маси; вуглеводи – 10,6 г /100 г сухої маси; білок – 0,9 г /100 г свіжої маси; жири – 0,2 г/100 г свіжої маси; сира клітковина – 1,2 г/100 г свіжої маси; загальний вміст золи – 1,1 г/100 г свіжої маси; загальний вміст цукру – 2,73-11,24/100 г сухої маси (глюкози – 0,02–1,7 г/100 г сухої маси; фруктози – 0,05–1,5 г/100 г сухої маси; сахарози – 0,5–3,3 г/100 г сухої маси); Са – 34–80 мг/100 г сухої маси; Р – 25–53 мг/100 г сухої маси; К – 240 мг/100 г добової маси; Mg – 9 мг/100 г свіжої маси; Fe – 0,4–2,2 мг/100 г; Na – 40 мг/100 г; Mn – 0,2–0,8 мг/100 г; Cu – 0,02 мг/100 г; загальний обсяг органічних кислот – 1,07–2,79 г/100 г сухої маси (хінінова кислота – 13,3–64,7 мг/100 г сухої маси; яблучна кислота – 26,0–266,2 мг/100 г сухої маси; аскорбінова кислота – 2,6–11,1 мг/100 г сухої маси; щавлева кислота – 5,2–5,4 мг/100 г сухої маси); вітамін С – 1,0–5,3 мг/100 г свіжої маси; вітамін Е – 191–703 мкг/100 г сухої ваги; загальний вміст фенолів – 7,3–224 мг/100 г сухої ваги; тетратерпеноїди (каротиноїди, хлорофіли) 0,2–4,1 мг/100 г сухої маси; загальний вміст каротиноїдів – 6–54,8 мг/100 г сухої маси [82].

Завдяки наявності значної кількості фітонутрієнтів, морква визнана функціональним продуктом харчування з критично важливими для зміцнення здоров'я властивостями, такими як каротиноїди, поліацетил, органічні кислоти та інші фенольні сполуки та терпеноїди [83 – 85].

У роботі [86] виявлено, що каротин і лютеїн є основними каротиноїдами, присутніми в моркві, причому  $\alpha$ -каротин,  $\beta$ -каротин і лютеїн становлять 99,9% від загальної кількості каротиноїдів [86].

Гарбуз походить з родини *гарбузових* (Cucurbitaceae) і вважається ключовою культурою в садівничій зоні. Гарбуз складається з м'якоті, насіння волокнистої

нитки та шкірки (рис. 2.2 (1)). Гарбуз (*Cucurbita*) належить до різних видів, але найпопулярнішими є *Cucurbita moschata*, *Cucurbita ficifolia*, *Cucurbita maxima*, *Cucurbita pepo* та *Cucurbita mixta* Pangalo [87]. Серед них лише три види, гарбуз мускатний (*Cucurbita moschata*), гарбуз велетенський (*Cucurbita maxima*) та гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*), мають важливе значення з високим економічним вирощуванням та виробництвом у всьому світі [88]. Найбільш поширені види представлені на рис. 2.2. (3–5).

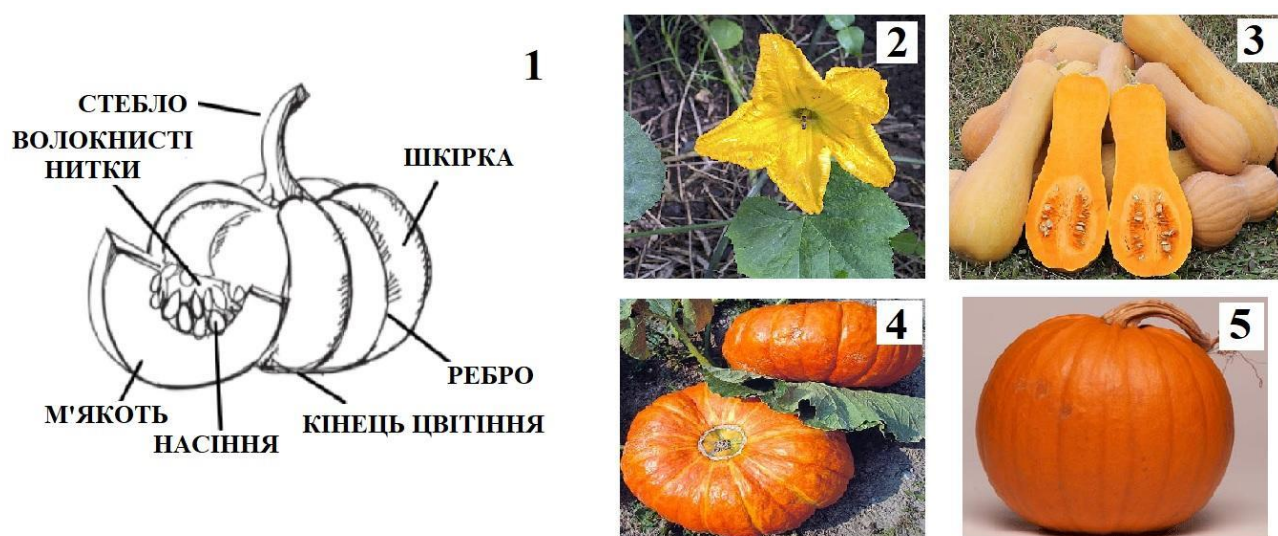


Рис. 2.2. Гарбуз (*Cucurbita*): 1 – схематичне зображення *Cucurbita*; 2 – квіти гарбуза; 3 – гарбуз мускатний (*Cucurbita moschata*); гарбуз велетенський (*Cucurbita maxima*); гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*)

Хімічний склад компонентів залежить від виду та варіюється залежно від регіону [88]. М'якоть та насіння є основними компонентами гарбуза. У м'якоті гарбуза містяться полісахариди, барвники, амінокислоти, активні білки та мінерали. Вони є чудовим джерелом калію, фосфату та магнію, а також хорошим джерелом ліпідів та білків [89 – 91].

У м'якоті гарбуза також містяться білки, каротин, мінеральні солі, вітаміни, полісахариди, такі як пектин, а також інші елементи, такі як фенольні сполуки та терпеноїди, які мають як харчову, так і оздоровчу цінність [89].

У гарбузі містяться наступні хімічні сполуки: вода – 91,6 г/100 г сухої маси; вуглеводи – 6,5 г /100 г сухої маси; білок – 1,0 г /100 г свіжої маси; жири – 0,1 г/100 г свіжої маси; сира клітковина – 0,5 г/100 г свіжої маси; загальний вміст золи – 0,8

г/100 г свіжої маси; загальний вміст цукру – 2,76 /100 г сухої маси; Ca – 21 мг/100 г сухої маси; Fe – 0,8 мг/100 г; Mg – 12 мг/100 г; P – 44 мг/100 г сухої маси; K – 340 мг/100 г добової маси; Na – 1,0 мг/100 г; Zn – 0,32 мг/100 г; Cu – 0,127 мг/100 г; Mn – 0,125 мг/100 г свіжої маси; Se – 0,3 мкг/100 г; вітамін А – 0,426 мг/100 г сухої ваги; вітамін С – 9,0 мг/100 г свіжої маси; вітамін Е – 1,06 мг/100 г сухої ваги; вітамін В1 – 0,05 мг/100 г сухої ваги; вітамін В2 – 0,11 мг/100 г сухої ваги; вітамін В3 – 0,6 мг/100 г сухої ваги; вітамін В5 – 0,298 мг/100 г сухої ваги; вітамін В6 – 0,061 мг/100 г сухої ваги; вітамін В9 – 0,016 мг/100 г сухої ваги; загальний вміст каротиноїдів – близько 8,62 мг/100 г сухої маси; загальна кількість насичених жирних кислот – 0,052 г /100 г сухої маси; загальна кількість мононенасичених жирних кислот – 0,013 г /100 г сухої маси; загальна кількість поліненасичених жирних кислот – 0,005 г/100 г сухої маси; аспарагінова кислота – 0,102 г /100 г сухої маси; глютамінова кислота – 0,184 г /100 г сухої маси [92].

У роботі [93] виконані дослідження термічного аналізу моркви та гарбуза, які представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Результати термічного аналізу [93]

Матеріал	Видалення води				Початок термічної деструкції, °С
	Температурний інтервал, °С	Вологість, %	Середня швидкість, %/хв.	Умовний тепловий ефект, мВ·с/мг	
Морква	22 – 179	86,84	1,93	95,13	179
Гарбуз	22 – 184	84,11	1,85	93,37	184

Результати досліджень показали, що дегідратація тканин при нагріванні розпочинається з температури навколишнього середовища і завершується за температур, що знаходяться в межах для моркви 22 – 179 °С та гарбуза 22 – 184 °С. Після досягнення температур 179 °С для моркви та 184 °С для гарбуза починається термічна деструкція певних термолабільних складових органічних речовин.

Під час створення функціональних продуктів харчування покладено модифікацію існуючих продуктів для збільшення вмісту корисних інгредієнтів до рівня, що відповідає фізіологічним нормам споживання та тривалому зберіганню [27].

Існує кілька способів перетворення продуктів харчування на функціональні продукти. Йдеться про зменшення кількості шкідливих речовин, що містяться в сировині, або збагачення продукту відсутніми мікроелементами шляхом поєднання різних видів сировини [27].

Каротиноїди найкраще перетворюються у ретинол тоді, коли в раціоні харчування є достатня кількість легко засвоюваного білку та жиру. Тому доцільним було створення таких каротиновмісних порошків, які містили б в собі повний комплекс цих сполук.

Цим вимогам відповідає така рослина, як соя. Соеві боби (*Glycine max* L.) – це бобові культури, що слугують джерелом високоякісного білка зі значною біологічною цінністю. Соеві боби, що походять з Китаю, мають 5000-річну історію вирощування і зараз широко вирощуються в усьому світі [94 – 96].

Соеві боби містять 40% білка, 35% вуглеводів, 20% ліпідів та 5% інших речовин [95, 97, 98]. Вміст білка в сої більш ніж удвічі перевищує вміст білка в таких зернових, як пшениця та рис [99], і еквівалентний вмісту білка в м'ясі, молочних продуктах та яйцях, при цьому не містить холестерину [97 – 99]. Соевий білок – це повноцінний білок, що містить дев'ять незамінних амінокислот, необхідних людському організму. Він в основному складається з запасеного білка, а також присутні інші білки, такі як  $\beta$ -амілаза, цитохром с, ліпоксигеназа та інгібітор Боумена-Бірка (BBI) [95].

Завдяки високому вмісту жирів, соя є в ряді регіонів основною олійною культурою. Поліненасичені жирні кислоти, які є важливими компонентами клітинних мембран та інших структурних компонентів рослинних тканин, виконують кілька життєво важливих функцій в організмі, включаючи нормальний ріст, метаболізм та підтримку еластичності кровоносних судин. Соеві боби також багаті на білок, вміст білка становить до 44% [44].

*Apium graveolens* L. (селера) – ароматична рослина родини Аріасеае, яка широко культивується в помірних та субтропічних регіонах світу, включаючи Європу, Азію, Африку та Америку [100]. Селеру можна розділити на три морфологічні типи залежно від її їстівних частин. *Apium graveolens* var. *dulce*, який зазвичай називають селерою, має тверді та соковиті черешки; *Apium graveolens* var. *secalinum*, який зазвичай називають китайською селерою, має тонкі та порожнисті черешки; а *Apium graveolens* var. *rapaceum*, який зазвичай називають кореневою селерою, розвиває збільшені гіпокотилі та коріння [101, 102].

В коренеплодах селери містяться білок, вуглеводи, ефірна олія (удвічі більше, ніж у листках) і мінеральні солі — калію, кальцію, фосфору, міді, заліза, магнію. Білок його багатий на амінокислоти — аргінін, гістидин, лізин, аланін [103, 104].

Гриби відомі як джерело поживних речовин, що містить різноманітні біологічно активні сполуки, що сприяють здоров'ю та покращують його. Їстівні гриби часто мають високий вміст білка, хоча вміст білка значно варіюється залежно від виду гриба, стадії росту та середовища росту. Вони містять незамінні амінокислоти, такі як лізин, валін, триптофан, ізолейцин, метіонін, лейцин та треонін [105]. Гриби шиїтаке стали важливою частиною світової індустрії їстівних грибів завдяки своїй унікальній харчовій цінності та широкому спектру ринків [106]. Гриби шиїтаке (*Lentinula edodes*) містять високий вміст білка, ненасичених жирів, мінералів та харчових волокон, і не містять шкідливих ліпідів чи холестерину [107].

До каротиновмістних рослин належить хурма. Хурма (*Diospyros kaki*) – цінний вид фруктових дерев помірного поясу, що походить зі Східної Азії [108]. Дослідження компонентів плодів хурми показали, що вони містять високий вміст антиоксидантів та біологічно активних сполук, таких як аскорбінова кислота, каротиноїди, поліфеноли (наприклад, проантоціанідин) та клітковина [109 – 111]. Хурма є багатим джерелом цукрів (близько 12,5 г/100 г сирої ваги), головним чином глюкози, фруктози та сахарози, а також загального вітаміну С (100–150 г свіжої хурми) [110].

## 2.2. Експериментальні установки та методики досліджень

### 2.2.1. Експериментальний конвективний сушильний стенд

Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих картоиновмістних матеріалів проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації (рис. 2.3) [112]. Який складається з основних компонентів: 3-х сушильних камер (1), блоку електричних нагрівачів (2), вентилятора (3), ізованих повітропроводів та систем контролю процесу сушіння.

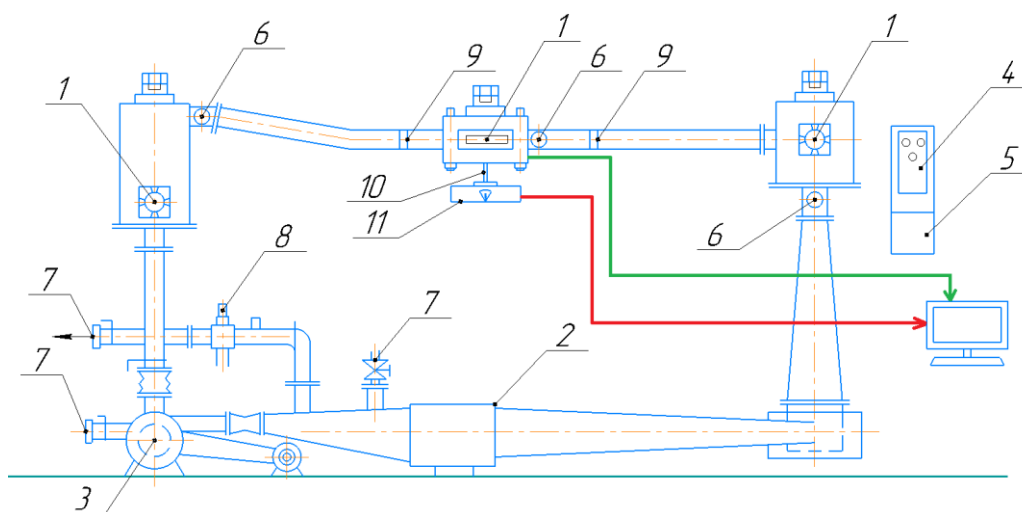


Рис. 2.3. Схема експериментального конвективного стенду для сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів [112, 113]: 1 – сушильні камери; 2 – електричні нагрівачі; 3 – вентилятор; 4 – терморегулятор; 5 – регулятор швидкості теплоносія; 6 – термометри опору; 7 – патрубки з шиберами; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга терезів; 11 – ваги AD-500

На щиті керування регулятором швидкості теплоносія (5) налаштовується робота вентилятора (3), який дозволяє досягти широкий діапазон коливань швидкості і температури теплоносія. Відцентровим вентилятором за допомогою перетворювача частоти при ручному регулюванні шляхом зміни подачі повітря регулюється швидкість руху теплоносія. Патрубками з шиберами (7) можливо регулювати співвідношення між відпрацьованим і свіжим повітрям.

Зразок дослідного матеріалу розміщують на штангах терезів (10), після встановлення на стенді заданого режиму дослідження. При цьому безперервно

реєструється зменшення маси зразка в процесі сушіння за допомогою вагів AD-500 (11) з'єднаних з комп'ютером.

На конвективному сушильному стенді допускається здійснювати термічну обробку композитної сировини теплоносієм температурою 30 – 150 °С і швидкістю 0,5 – 5 м/с. Встановлені високоточні ваги можуть реєструвати зміни маси зразка до 0,001 г. Температура в сушильній камері підтримується з точністю до 0,02°С. Зчитування експериментальних даних про зміну маси та температури зразка, температури сушильного агента в сушильній камері відбувається 7 раз за хвилину і записується на комп'ютері. Похибки запису даних на експериментальному конвективному сушильному системою автоматизованого збору інформації становить для температур не перевищує  $\pm 1^\circ\text{C}$  та маси  $\pm 5\text{мг}$ .

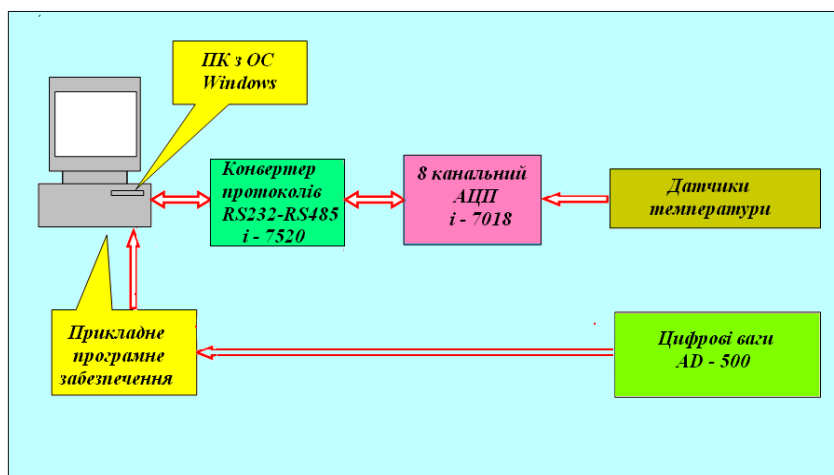


Рис. 2.4. Структурна схема автоматизованого збору та обробки інформації із конвективного сушильного стенду

Для підвищення точності, інформативності та зручності обробки інформації, отриманої в ході експерименту, експериментальний стенд оснащений допоміжним обладнанням, таким як аналого-цифровий перетворювач i-7018, конвертором-інтерфейсом i-7520 та персональним комп'ютером з процесором CPU AMD ATHLON XP 2200+ (рис. 2.4).

Дільниця теплової підготовки повітря виконана у вигляді прямокутного короба, в якому розміщений трьохсекційний електронагрівач потужністю 45 кВт, який дозволяє підтримувати та регулювати температуру повітря в широких діапазонах. Для точної підтримки заданої температури встановлений

терморегулятор Овен ТРМ 101 з точністю спрацювання сигнальних контактів  $\pm 0,5$  °С та термометрів опору ТСМ-50 [113].

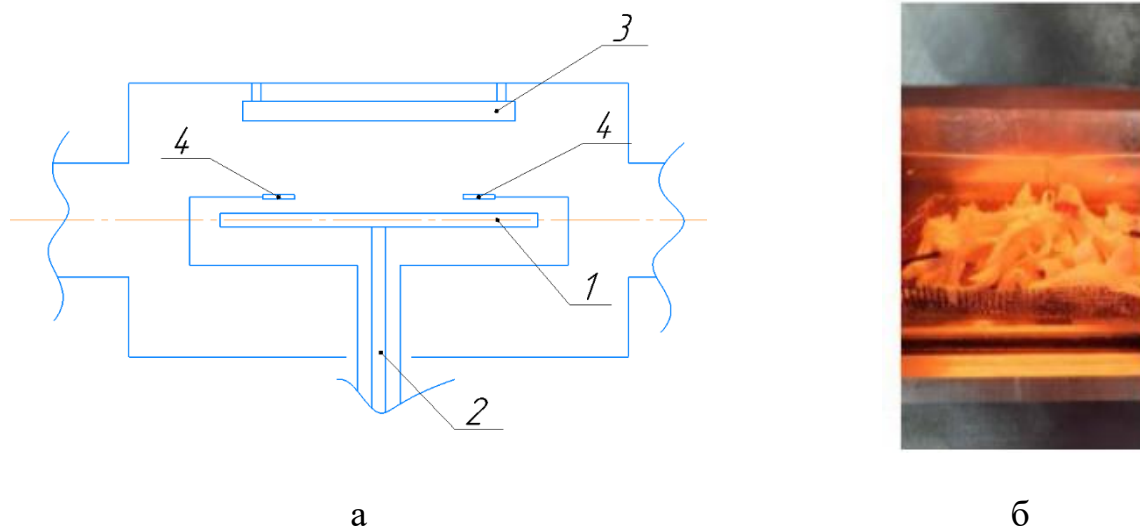


Рис. 2.5. Сушильна камера експериментального конвективного стенду, схематичне зображення (а) та при роботі установки (б) [113]: 1 – сітка, 2 – штанга терезів; 3 – інфрачервоні лампи, 4 – термопари

Сушильна камера, представлена на рис. 2.5, являє собою прямокутний короб з листового металу з знімальним люком. Камера має прозоре скло, через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння. Для визначення зміни маси під час сушіння на вагу встановлена штанга 2 із сіткою 1, на якій розташовують матеріал, що піддається термічній обробці. В матеріал встановлюється хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі 4 (ДСТУ 2837 – 94 [114]) діаметром 0,2 мм, для знімання експериментальних даних зміни температури. Також у камері встановлені інфрачервоні випромінювачі 3.

***Методика проведення досліджень на конвективному сушильному стенді:***

1. Перед проведенням досліджень визначають початкову вологість матеріалу. Матеріал висипають в бюкси і на протягом 5 годин при температурі 105°С висушуємо в сушильній шафі. Після закінчення сушіння бюкси виймають з сушильної шафи і ставлять в ексикатор для охолодження на 15 –30 хв. Охолоджені бюкси з композитом зважують у закритому стані на терезах.

В теорії сушіння вологість матеріалу розраховується відносно маси абсолютно сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною [115].

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q = q_{\text{вл}} - q_{\text{ср}}, \quad (2.1)$$

де  $q_{\text{вл}}$  – маса вологи, кг;  $q_{\text{ср}}$  – маса сухої речовини, кг

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси обчислюють за формулою, %:

$$W = \frac{q_{\text{вл}}}{q} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (2.2)$$

де  $m_1$  – маса порожньої бюкси (з кришкою), г;  $m_2$  – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;  $m_3$  – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100, \quad (2.3)$$

де  $m_1$  – маса порожньої бюкси (з кришкою), г;  $m_2$  – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;  $m_3$  – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Формули переходу, %:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100,$$

$$W^c = \frac{W}{100 - W} \cdot 100,$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в *кг вологи/(кг сухої речовини)*, то отримаємо вологовміст (питомий масовміст) матеріалу [115]:

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \quad (2.4)$$

2. Дослідження сушіння матеріалів починають з встановленням режиму сушіння на стенді, розміщують матеріал на сітці, яка знаходиться на штанзі вагів в сушильній камері і вмиканням комп'ютерної програми збору та обробки інформації, що безперервно реєструє час та зміну маси навіски, температури теплоносія та температури в середині матеріалу. Приклад знімання кінетики процесу сушіння композиту наведено на рис. 2.6.

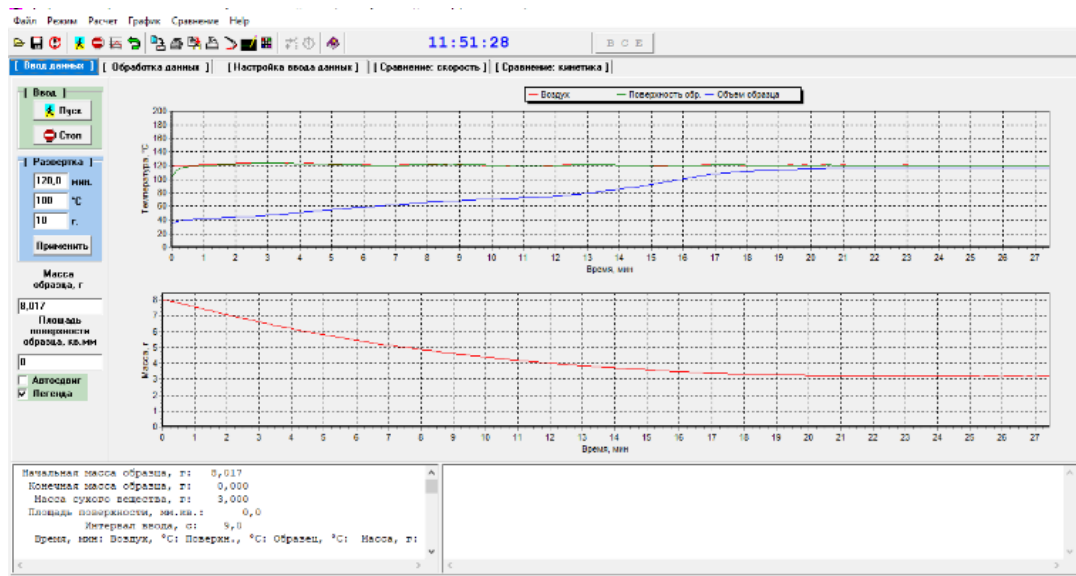


Рис. 2.6. Панель управління системою збору та обробки інформації експериментального конвективного сушильного стенду

3. Розрахунок характеристик відбувається за допомогою спеціально розробленої програми «Sooshka».

3.1. Кінетика процесу сушіння:

$$W_{c.p.}(t) = \frac{G(t) - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

де  $G(t)$  – розрахункові маси зразка, г;  $G_{a.c.}$  – абсолютно суха маса матеріалу, г.

3.2. Швидкість сушіння визначається, %/хв:

$$N = \frac{dW}{d\tau} = \frac{du}{d\tau} \cdot 100, \quad (2.6)$$

де  $\tau$  – час сушіння, хв.

Температурний коефіцієнт сушіння представляє собою оцінку похідна середньої температури зразка від вологовмісту:

$$b = dt_{cp}/du, \quad (2.7)$$

де  $u = W_{c.p.}/100$  – вологовміст зразка, кг/кг с.р.;  $t_{cp}$  – вираховується як середнє значення розрахунку температури на поверхні та в матеріалі зразка, °С.

3.4. Критерій оптимізації сушіння дорівнює відношенню витрат кількості тепла на нагрівання тіла до кількості тепла на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = \frac{c}{r}b, \quad (2.8)$$

де  $c$  – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С);  $r$  – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг.

Тепловий потік на одиницю поверхні зразка вираховується із співвідношення, кВт/м<sup>2</sup>:

$$q(\tau) = rg(du/d\tau)(1 + Rb), \quad (2.9)$$

де  $g = G_{a.c}/S_{вл}$  – відношення маси абсолютно сухого тіла до поверхні матеріалу.

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою, Вт / (м<sup>2</sup>·°С):

$$\alpha = \frac{1000 \cdot q(\tau)}{t - t_c}, \quad (2.10)$$

де  $t$  – температура теплоносія;  $t_c$  – температура зразка.

### 2.2.2. Методика визначення каротиноїдів в сировині

В дослідженнях було використано спектрофотометричні та тетраметричні методи по визначенню каротиноїдів. Перед дослідженнями каротиноїди екстрагували з сирі сировини гексаном, а потім переводили в ацетон. Кількісне визначення проводили за допомогою спектрофотометра [44].

Каротиноїдні пігменти розчинні в жирах та зазвичай мають забарвлення від жовтого до червоного. Вони в невеликій кількості присутні в рослинах та тваринах. Поглинання каротиноїдів обумовлено довжиною ланцюга спряжених етиленових зв'язків, причому в  $\beta$  –каротині типовому представнику цього класу їх не менше

одинадцяти. Забарвлення цих пігментів пов'язане з наявністю в області 400 – 500 нм інтенсивної смуги поглинання, яка має три максимуму. Положення останніх точно визначена і використовується для ідентифікації і кількісного визначення каротиноїдів. Як правило доступна лише невелика кількість пігменту, тому спектрофотометричний метод, завдяки своїй високій чутливості, знайшов широке використання при дослідженні цих речовин [44]. В даному конкретному випадку, кількісне визначення каротину носить орієнтовний характер, тобто методика його визначення не передбачає виділення каротинів в чистому вигляді. Однак, з огляду на той факт, що в цій області спектру поміщають переважно каротини і антиціаниди (останні розчиняються у воді і тим самим відокремлюються від каротинів), можна рахувати, що в межах визначеної похибки такі визначення є надійними.

Сутність методу оснований на екстракції каротину ацетоном і колориметризовані зафарбованих розчинів в фотоелектроколориметрі і порівняння забарвлення досліджуваного розчину з забарвленням розчину двохромовокислого калію.

#### ***Проведення досліджень:***

Беруть наважку порошку 0,1 г, зважують з похибкою  $\pm 0,0002$  г, ретельно розтирають в фарфоровій ступці з дрібним піском, додають 10 мл спирту.

Подрібнену біомасу кількісно переносять на воронку Шотта, на яку попередньо насипають дрібне скло або кварцовий пісок, відфільтровують і потім багатократно, до повного знебарвлення розчину, промивають її ацетоном, не допускаючи підсихання осаду на фільтрі.

Розчин збирають в мірну колбу на 100 мл і доводять ацетоном до мітки, вимірюють оптичну щільність осаду на фільтрі.

#### **Обробка результатів**

Масову долю каротину ( $X_4$ ) в процентах визначають по формулі:

$$X_3 = \frac{a \cdot U \cdot D \cdot 100}{D_2 \cdot m} \quad (2.11)$$

де  $m$  – маса наважки порошку, г;  $У$  – об'єм розчину каротину;  $Д$  – оптична щільність досліджуваного розчину;  $Д_2$  – оптична щільність стандарту;  $a$  – коефіцієнт перерахунку на каротин,  $a = 0,00208$ .

### 2.2.3. Спектрофотометр СФ – 26

Для визначення каротинів в колоїдній капілярно-пористій рослинній сировини застосовувався спектрофотометр СФ – 26 (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Спектрофотометр СФ – 26

Цей прилад призначений для вимірювання коефіцієнта пропускання досліджуваного зразка  $T$ , який дорівнює відношенню інтенсивності потоку випромінювання  $I$ , що проходить через матеріал, до інтенсивності потоку випромінювання  $I_0$ , що падає на досліджуваний зразок або проходить через контрольний зразок, причому коефіцієнт пропускання приймається за 1 та виражається за формулою [116].

$$T = \frac{I}{I_2} \cdot 100, \quad (2.12)$$

Вимірювання проводиться по методу електричної автокомпенсації. В монохроматичний потік випромінювання по черзі вводяться контрольний і досліджуваний зразки. При введенні контрольного зразка стрілка вимірювального пристрою встановлюється на поділку «100» регулювачем ширини щілини, і значення встановленого при цьому світлового потоку приймають за 100 % пропускання. При введенні в потік випромінювання досліджуваного зразка вимірювального пристрою відхиляється пропорційно вимірюванню потоку,

величина коефіцієнта пропускання відраховується по шкалі в процентах пропускання [116].

#### 2.2.4. Методика визначення регідратаційних властивостей сухих каротиновмістних матеріалів

Досліджувані зразки білково-каротиновмісної сировини були підготовлені порошку із дисперсністю менше 0,5 мм. Коефіцієнт набухання визначали методом описаним у роботі [26].

Суть методу полягає в тому, що в підготовлених бюксах зважується досліджуваний матеріал масою 1 г, заливається водою у співвідношенні 1:10. Витримується певний проміжок часу – 30 хв, рідина зливається, а відновлений зразок зважується та розраховується коефіцієнт набухання  $K_n$ , який показує відносне збільшення маси продукту після набухання і визначає здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Коефіцієнт набухання розраховується за формулою:

$$K_n = \frac{G_2}{G_1}, \quad (2.13)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт набухання;  $G_1$  та  $G_2$  – маса матеріалу до та після набухання відповідно, г.

Процес відновлення будь-якого порошку містить у собі певну послідовність стадій: змочування, осідання, диспергування, суспензування [27]. Першим етапом процесу відновлення сухих рослинних порошоків є змочування рідиною. Змочування порошоків характеризується часом змочування, який вимірюється в секундах. Другий етап процесу відновлення є час осідання. Змочений порошок повинен зникнути з поверхні рідини протягом визначеного часу, наприклад, сухий молочний білок – максимально за 20 секунд, какао-порошок – приблизно за 10 секунд [27]. Після осідання відбувається диспергування порошку – розділення на більш дрібні складники. Від цієї здатності буде залежати, наскільки якісним стане кінцевий продукт. Кінцевим результатом процесу відновлення харчових рослинних порошоків є отримання стійкої, без ознак седиментації суспензії, як результат

послідовного процесу доброго змочування, осідання, диспергування частиною порошку рідини [27].

Порошки, які містять велику кількість білку характеризуються водоутримуючою здатністю (ВУЗ). Для визначення ВУЗ застосовують метод центрифугування, він передбачає гідратацію наважки суміші при визначених модулі і температурі. Осад центрифугують і висушують. Співвідношення випареної води до маси висушеного твердого залишку дає величину ВУЗ. Час попереднього замочування, температура, швидкість та час центрифугування істотно не впливає на величину ВУЗ [44].

### **2.3. Висновки до другого розділу**

1. У розділі обґрунтовано вибір сировини для подальшого дослідження.
2. У розділі наведено опис приладів та установки, за допомогою яких були проведені експериментальні теплофізичні та фізико-хімічні дослідження каротиновмістної рослинної сировини на основі моркви та гарбуза.
3. Викладено підібрані та використані методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.
4. В дослідженнях використовували стандартні прилади і методи, а саме: експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів - для визначення кінетики сушіння каротиновмістної рослинної сировини; спектрофотометр СФ – 26 – для визначення біологічно активних речовин (каротину) рослинної сировини на основі моркви та гарбузу; методику визначення каротиноїдів, коефіцієнту набухання відновлюваності та ВУЗ.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПЛІАРНО–ПОРИСТИХ КАРОТИНОВМІСТНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 3.1. Попередня підготовка рослинної сировини та створення сумішей

Як було сказано раніше каротиноїди найкраще перетворюються у ретинол тоді, коли у раціоні харчування є достатня кількість легко засвоюваного білку та жиру. Тому для кращого збереження каротиновмістної складової були вирішено створити суміші на основі моркви та гарбуза, які б містили б в собі повний комплекс каротиноїдів, ліпідів та білків.

В Інституті технічної теплофізики НАН України Петровою Ж.О. було розроблено попередню обробку антиоксидантної каротиновмістної сировини, яка полягає у купажуванні сировини з білково- та жироровмісними компонентами та обробка парою протягом 3 хв при температурі середовища 98°C та витримка суміші протягом 7 хв при температурі 55,8°C, що дозволило отримати витрати каротиноїдів до 4,4 % [27].

Нами було виконано поєднання моркви з селерою у співвідношенні 1:1, що дає стабілізацію каротиноїдів навіть на початку процесу без гігротермічної обробки на 11 – 23%. Очевидно, вже під час подрібнення та перемішування відбувається стабілізація каротиноїдів за рахунок жиру, ефірних масел селери, білків і вітаміну С.

Моркву та суміш морквяно-селерну обробляли таким чином, тобто селеру перемішували разом з подрібненою морквою, а також подрібнену моркву, обробляли гострою парою. Розглядаючи динаміку втрат каротиноїдів під час гігротермічної обробки морквяно-селерної спостерігаємо таку ж залежність як і в моркві. Селеру також потрібно бланшувати для запобігання ферментативного Браунінга. Поліфенолоксидаза несе пряму відповідальність за ферментативне потемніння і тому її потрібно інгібувати парою.

У таблиці 3.1 приведені дані про зміну каротиноїдів від умов підготовки сировини до сушіння під час сушіння [117].

Сама гігротермічна обробка майже не руйнує каротиноїди (табл. 3.1), ці мінімальні втрати обумовлені механічним руйнуванням хромопластів на лінії розрізу паренхіми моркви.

Таблиця 3.1. Підготовка антиоксидантної сировини до сушіння  
(гігротермічна обробка)

Сировина	Умови гігротермічної обробки		Втрати каротиноїдів, %	
	Час обробки, хв.	Температура обробки, °С	під час гігротермічної обробки	під час сушіння при температурі 70°С
Морква	0	–	–	44
	2	(пара 98°С) / (вода 98 °С)	0,8 / 1,0	19,8 / 13,5
	3	(пара 98°С) / (вода 98 °С)	0,7 / 2,1	11,0 / 12,1
	5	(пара 98°С) / (вода 98 °С)	0,6 / 2,5	11,5 / 17,4
	7	(пара 98°С) / (вода 98 °С)	0,7 / 3,6	15,6 / 26,9
	10	(пара 98°С) / (вода 98 °С)	0,8 / 3,8	25,5 / 35,4
Морквяно-селерна суміш	0	–	–	33,4
	2	(пара 98°С)	0,6	16,8
	3	(пара 98°С)	0,5	5,1
	5	(пара 98°С)	0,6	5,7
	7	(пара 98°С)	0,7	12,3
	10	(пара 98°С)	0,6	21,1

Найбільші втрати каротиноїдів, як видно з рис. 3.1 без підготовки сировини до сушіння 44% (поз. 1). Існуюча технологія гігротермічної обробки (поз. 2) дає втрати до 25%. Розроблені нами режими бланшування моркви дозволили зменшити втрати каротиноїдів під час сушіння до 12% (поз. 3). Купажування каротиновмісної сировини та обробка парою протягом 3-5 хв дає можливість отримати найкращі результати при яких втрати становлять 5,1% (поз. 4). Отже, оптимальними умовами підготовки каротиновмісної сировини є купажування цієї сировини та обробка

парою 3 хв. З огляду на те, що гіротермічна обробка відбувається з певними енерговитратами, немає сенсу збільшувати час обробки.

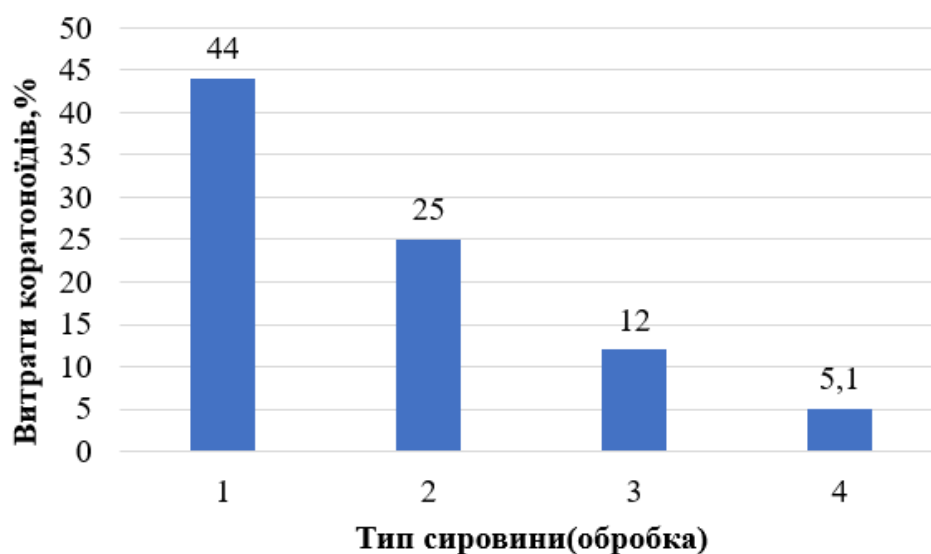


Рис. 3.1. Гіротермічна обробка моркви: 1 – морква без гіротермічної обробки; 2 – існуюча технологія гіротермічної обробки моркви; 3 – гіротермічна обробка моно сировини; 4 - гіротермічна обробка селеро-морквяної сировини

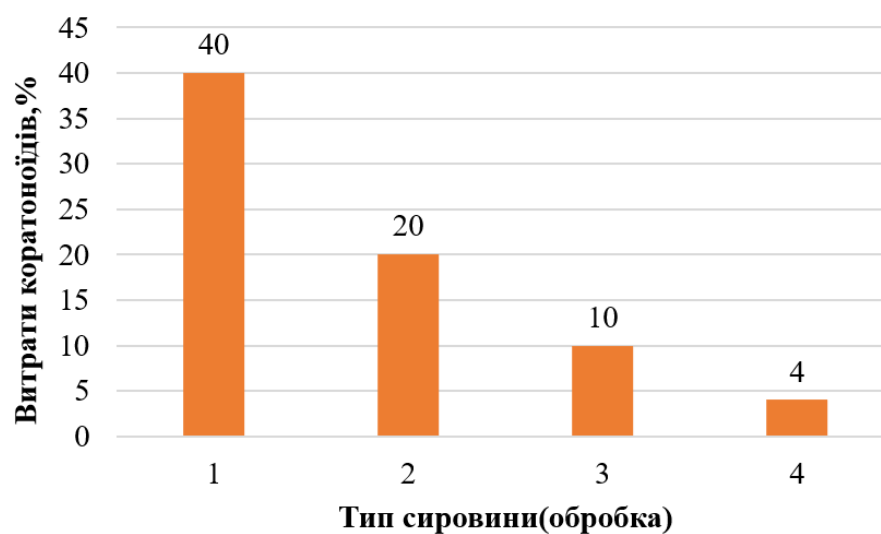


Рис. 3.2. Гіротермічна обробка гарбуза: 1 – гарбуз без гіротермічної обробки; 2 – існуюча технологія гіротермічної обробки гарбуз; 3 – гіротермічна обробка моно сировини; 4 - гіротермічна обробка гарбузово-хурмової сировини

Найбільші втрати каротиноїдів при переробці гарбуза, як видно з рис. 3.2 без підготовки сировини до сушіння 40% (поз. 1). Існуюча технологія гіротермічної обробки (поз. 2) дає втрати до 20%. Розроблені нами режими бланшування гарбуза

дозволили зменшити втрати каротиноїдів під час сушіння до 10% (поз. 3). Купажування каротиновмісної сировини та обробка паром протягом 3-5 хв дає можливість отримати найкращі результати при яких втрати становлять 4% (поз. 4). Отже, оптимальними умовами підготовки каротиновмісної сировини є купажування цієї сировини та обробка паром 3 хв. З огляду на те, що гіротермічна обробка відбувається з певними енерговитратами, немає сенсу збільшувати час обробки.

Також була створена суміш на основі моркви та сої у співвідношенні у 1:1. Попередня обробка до поєднання була суміші полягала у тому, що сою промивають водою протягом 5 хвилин, далі її замочували 60 хв у воді температурою 50 °С, а потім проварювали 20 хвилин при температурі 90-100°С. Ця обробка дозволяє повністю інактивувати трипсин – антихарчового білка, що при цьому значно підвищує перетравлюваність білків, що є позитивним. Після чого моркву натирали на терці та перемішували з соєвими бобами.

### **3.2. Дослідження кінетики процесу сушіння гарбузово-хурмяної суміші на конвективному сушильному стенді**

Дослідження сушіння проводили до вологості матеріалу  $7\pm 1\%$ . Для гарбуза та суміші на його основі товщина шару дорівнювала 5 мм.

На рисунку 3.3 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння гарбуза. З рисунку 3.3 видно, збільшення температури теплоносія з 65 °С до 100 °С скорочує час сушіння гарбуза на 35%, а швидкість зростає в 1,5 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100 °С призводить до погіршення якості сушеного гарбуза, а саме потемніння матеріалу та підгорілий присмак.

Далі були виконані дослідження гарбузово-хурмяної суміші за режимами сушіння 65, 100, 100/65, °С та комбінованим  $3800\text{Вт/м}^2 + 65\text{ °С}$ , швидкість теплоносія 3,0 м/с.

На рис. 3.4 представлені зміна вологовмісту та температурні криві сушіння гарбузово-хурмяної суміші. Як видно з рисунку 3.3 найбільша тривалість сушіння у режиму 65 °С та становить 131 хв. Найменша тривалість при 100 °С та становить

73 хв, але при цьому матеріал має потемніння та пригорілий присмак.

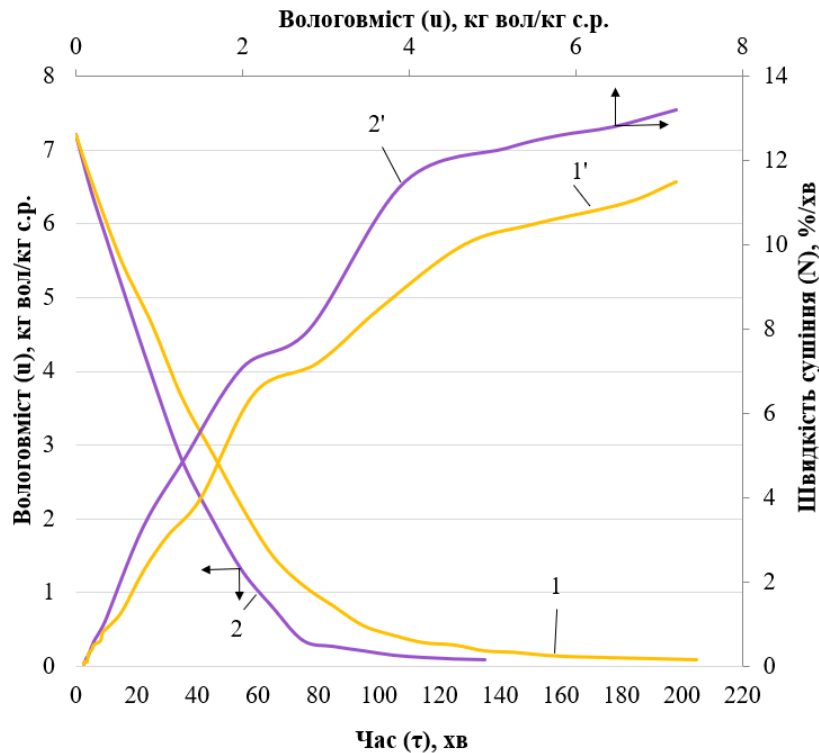


Рис. 3.3. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') гарбуза в шарі а різних температур теплоносія ( $\delta \approx 5$  мм,  $V=3$  м/с): 1 – 65 °С; 2 – 100 °С

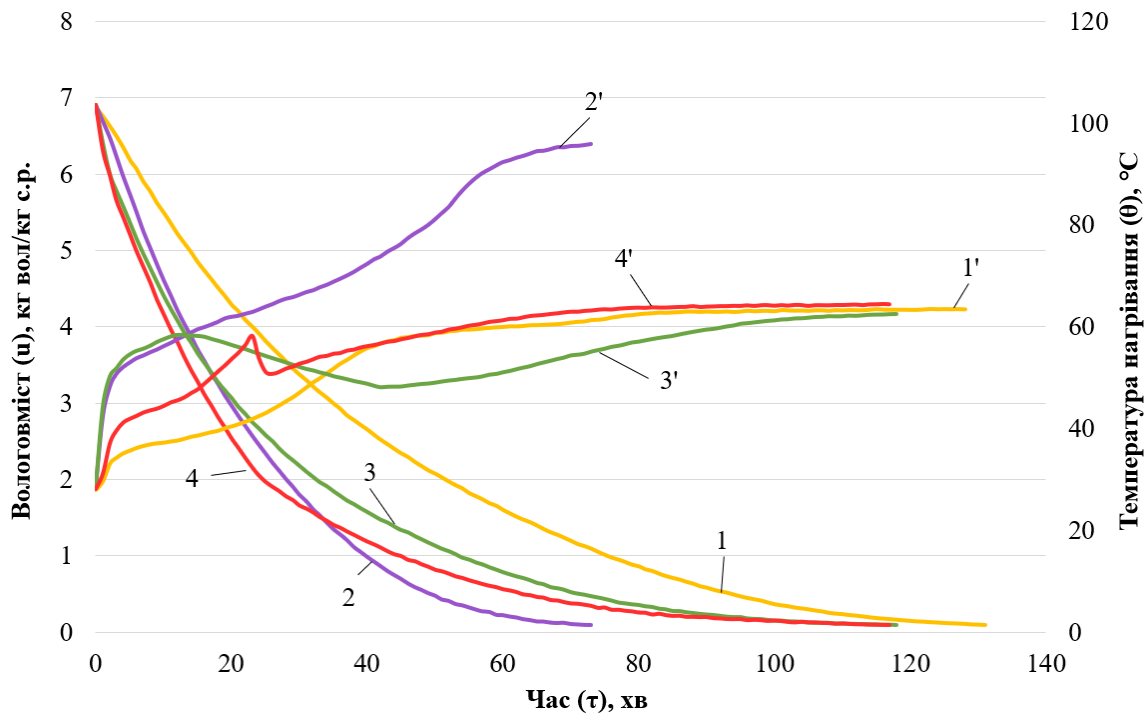


Рис. 3.4. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') суміші на основі гарбуза та хурми в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 5$  мм,  $V=3$  м/с): 1 – 65 °С; 2 – 100 °С; 3 – 100/65 °С; 4 –  $3800 \text{ Вт/м}^2 + 65$  °С

Для ступеневого режиму 100/65 °С та комбінований 3800Вт/м<sup>2</sup> +65°С на початку процесу матеріал доводили до температури 58 °С, після чого зменшували температуру та вмикали інфрачервоні лампи для подальшого сушіння за температури 65°С. Ці режими мають нижчу тривалість порівняно з 65 °С та становлять 118хв для 100/65 °С та 117 хв для 3800Вт/м<sup>2</sup>+65°С.

На початку дослідження за комбінованим режимом 3800Вт/м<sup>2</sup> +65 °С працювали інфрачервоні лампи на потужності 3800Вт/м<sup>2</sup> та теплоносій 65 °С при після досягнення температури матеріалу 58 °С вимикали інфрачервоні лампи та температура матеріалу починала знижуватися до 50,7 °С, далі вона підіймається до 64,36 °С. За ступеневим режимом 100/65 °С матеріал сушили при температурі теплоносія 100 °С до температури матеріалу 58 °С. Потім температуру теплоносія зменшували до 65 °С, при цьому температура матеріалу збільшилась до 58,44 °С, після чого температура матеріалу поступово зменшувалася до 48,16 °С, та подальшому збільшувалася до 62,6 °С.

На рис. 3.5 представлена зміна швидкості сушіння гарбузово-хурмової суміші.

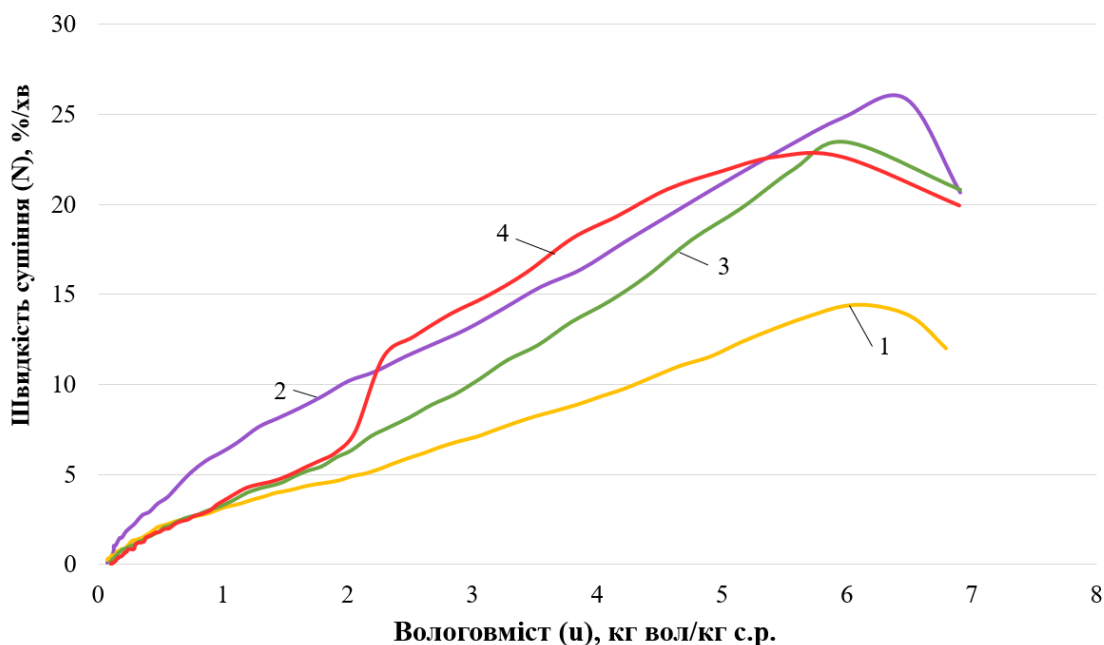


Рис. 3.5. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) суміші на основі гарбуза та хурми в шарі а різних температур теплоносія ( $\delta \approx 5$  мм,  $V=3$  м/с):

1 – 65 °С; 2 – 100 °С; 3 – 100/65 °С; 4 – 3800Вт/м<sup>2</sup>+65 °С

Як видно з рис. 3.5 максимальна швидкість сушіння за режимом 100 °С і становить 25,8 %/хв, найменша за режимом 65°С – 14,3%/хв. Комбінований режим 3800Вт/м<sup>2</sup> +65 °С має максимальну швидкість сушіння 22,6 %/хв при увімкнених інфрачервоних лампах, при вимиканні спостерігається різке зменшення швидкості з 11,5%/хв до 6,24%/хв і потім іде поступове зменшення. За ступеневим режимом 100/65 °С максимальна швидкість сушіння 24,8%/хв.

### 3.3. Дослідження кінетики сушіння каротиновмісної сировини на основі моркви на конвективному сушильному стенді

Дослідження сушіння проводили до вологості матеріалу 7±1%. Для моркви та суміші на його основі товщина шару дорівнювала 10 мм.

На рис. 3.6 представлені експериментальні криві кінетичні та швидкості сушіння моркви.

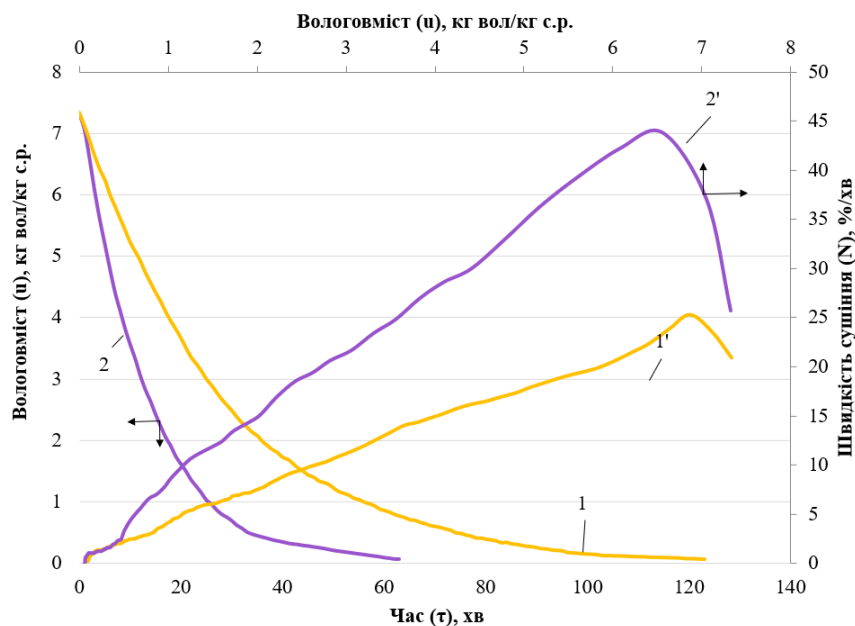


Рис. 3.6. Зміна вологовмісту (1, 2) та швидкості сушіння (1', 2') моркви в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,5$  м/с): 1 – 70 °С; 2 – 100 °С

З рисунку 3.6 видно, при збільшенні температури теплоносія з 70 °С до 100 °С скорочує час сушіння моркви у 1,95 разів, при цьому швидкість зростає в 1,73 рази. При цьому збільшення температури теплоносія до 100 °С призводить до погіршення якості сушеної моркви, а саме потемніння матеріалу та підгорілого присмаку.

### 3.3.1. Дослідження кінетики сушіння морквяно-селерної суміші

Далі були виконані дослідження морквяно-селерної суміші за режимами сушіння 60, 70, 80, 100, 100/70 °С швидкість теплоносія 3,5 м/с. Кінетика процесу сушіння морквяно-селерної суміші представлена на рис. 3.7.

З збільшенням температури теплоносія зменшується тривалість сушіння, так при температурі 60°С тривалість сушіння 125 хв., а вже при температурі 70 – 80 °С, тобто зменшення тривалості складає 1,56 раз. Подальше збільшення температури на 10°С до температури 80°С приводить до зменшення тривалості в 1,15 раз. При температурі 100°С сушіння морквяно-селерної суміші проходить найшвидше за 58 хв (рис. 3.7). При ступеневому режимі інтенсивність процесу досягається наступним чином: на початку сушіння на протязі 30 хв температура теплоносія складає 100 °С, потім коли температура матеріалу підвищується температуру знижують до 70 °С і підтримують на такому рівні до кінця процесу сушіння. Тривалість процесу за ступневим режимом 100/70 °С зменшується у 1,92 рази порівняно з 60 °С.

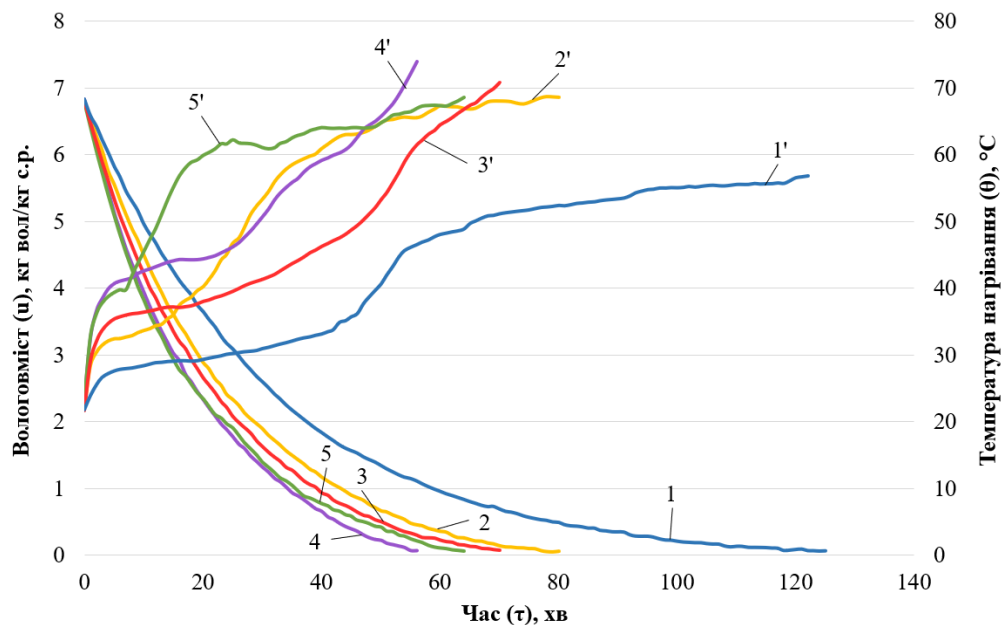


Рис.3.7. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4, 5) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4', 5') морквяно-селерної суміші в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,5$  м/с): 1 – 60 °С; 2 – 70 °С; 3 – 80 °С; 4 – 100 °С; 5 – 100/70 °С

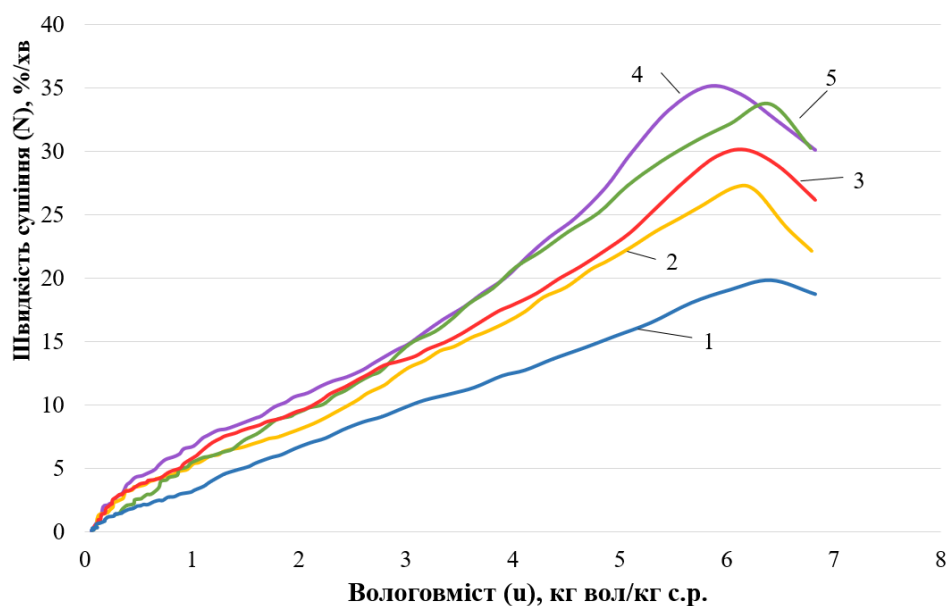


Рис. 3.8. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4, 5) морквяно-селерної суміші в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,5$  м/с):  
1 – 60 °C; 2 – 70 °C; 3 – 80 °C; 4 – 100 °C; 5 – 100/70 °C

На кривих швидкості сушіння видно, що процес сушіння проходить наступні етапи: нагрівання до максимального значення швидкості сушіння і період падаючої швидкості сушіння до кінцевої вологості 6..10%. Максимальне значення швидкості при сушінні морквяно-селерної суміші настає при вологовмісту 5,8-6,7 кг вол./кг с.р. (рис. 3.8).

Максимальна швидкість сушіння морквяно-селерної суміші при температурі 100°C – 35,1%/хв., що у 1,7 разів більше за максимальну швидкість при температурі 60°C.

### 3.3.2. Дослідження кінетики сушіння білково-морквяної суміші

Дослідження сушіння білково-каротиновмісної суміші на основі моркви та сої виконували за режимами сушіння 80, 100, 120, 100/80 °C та швидкістю теплоносія 3,0 м/с.

На рисунку 3.9 представлені зміна вологовмісту та температурні криві сушіння білково-каротиновмісної сировини. З рисунку 3.8 видно, що при збільшенні температури теплоносія з 80 до 120 °C тривалість сушіння зменшується у 2,1 рази. Однак при сушінні за режимом теплоносія 120 °C спостерігається різке

підвищення температури матеріалу, і після того як матеріал досяг температури 70 - 80 °С, відбулось його різке потемніння та псування зовнішнього вигляду.

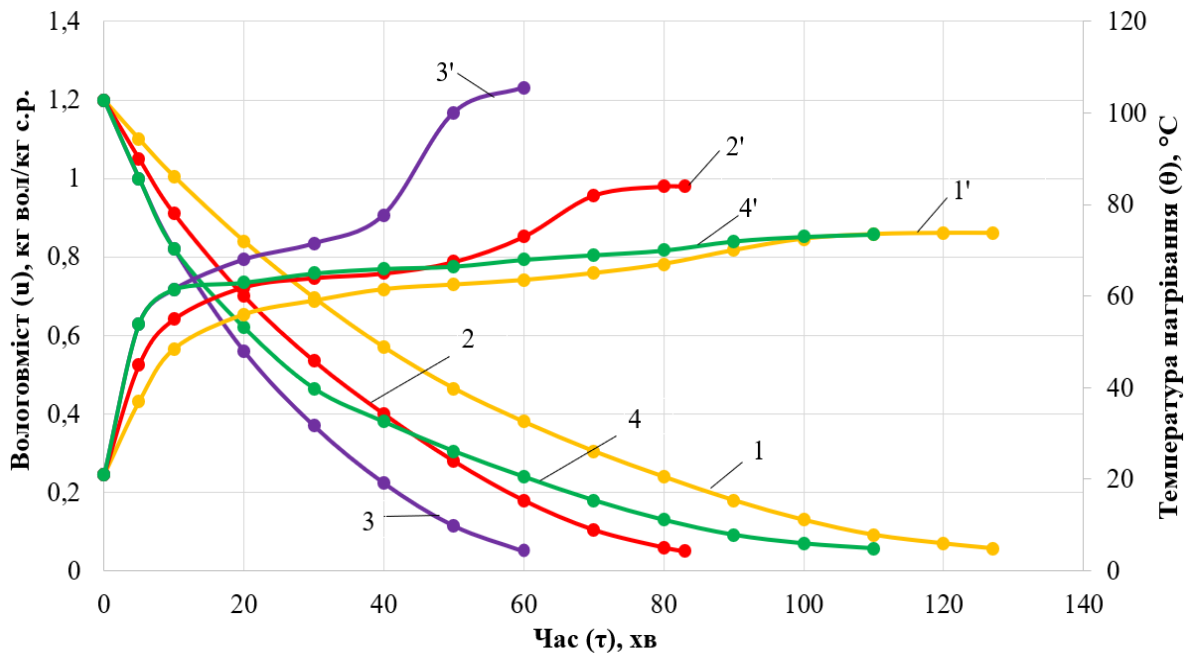


Рис. 3.9. Зміна вологовмісту (1, 2, 3, 4) та температури всередині шару (1', 2', 3', 4') білково-каротиновмісної суміші у співвідношенні 1:1 в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,0$  м/с):  
1, 1' – 80 °С; 2, 2' – 100 °С; 3, 3' – 120 °С; 4, 4' – 100/80 °С

Для ступеневого режиму 100/80 °С на початку процесу (рис. 3.9) температура теплоносія дорівнює 100 °С. Через 15 – 20 хвилин сушіння температуру теплоносія знижують до 80 °С (крива 4 на рисунку 3.9).

Сушена суміш, одержана за режимами (криві 1, 4) мала світло-жовтий колір, зі смаком, властивим вихідним інгредієнтам. З проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальним режимом сушіння повинен бути режим, при якому температура матеріалу не перевищує 70 °С - 80 °С.

На рис. 3.10 представлена зміна швидкості сушіння білково-каротиновмісної суміші. Криві швидкості сушіння показують (рис. 3.10), що із збільшенням температури теплоносія інтенсивність зневоднення зростає.

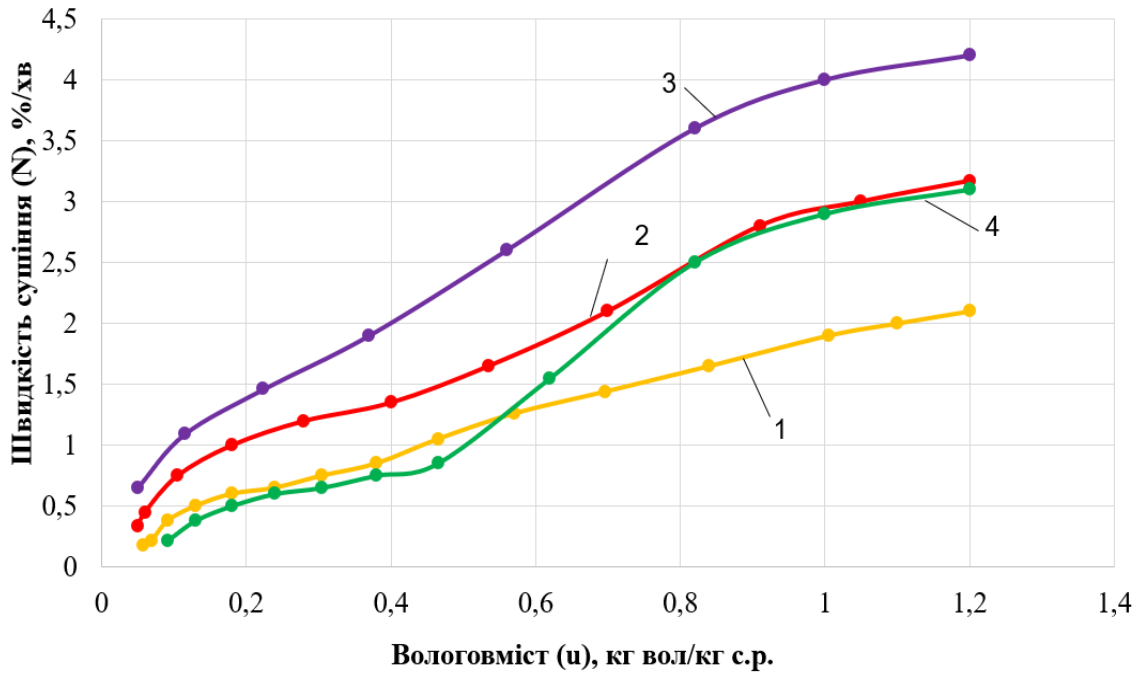


Рис. 3.10. Зміна швидкості сушіння (1, 2, 3, 4) білково-каротиновмістної суміші в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,0$  м/с):

1 – 80 °С; 100 °С, 3 м/с; 3 – 120 °С; 4 – 100/80 °С

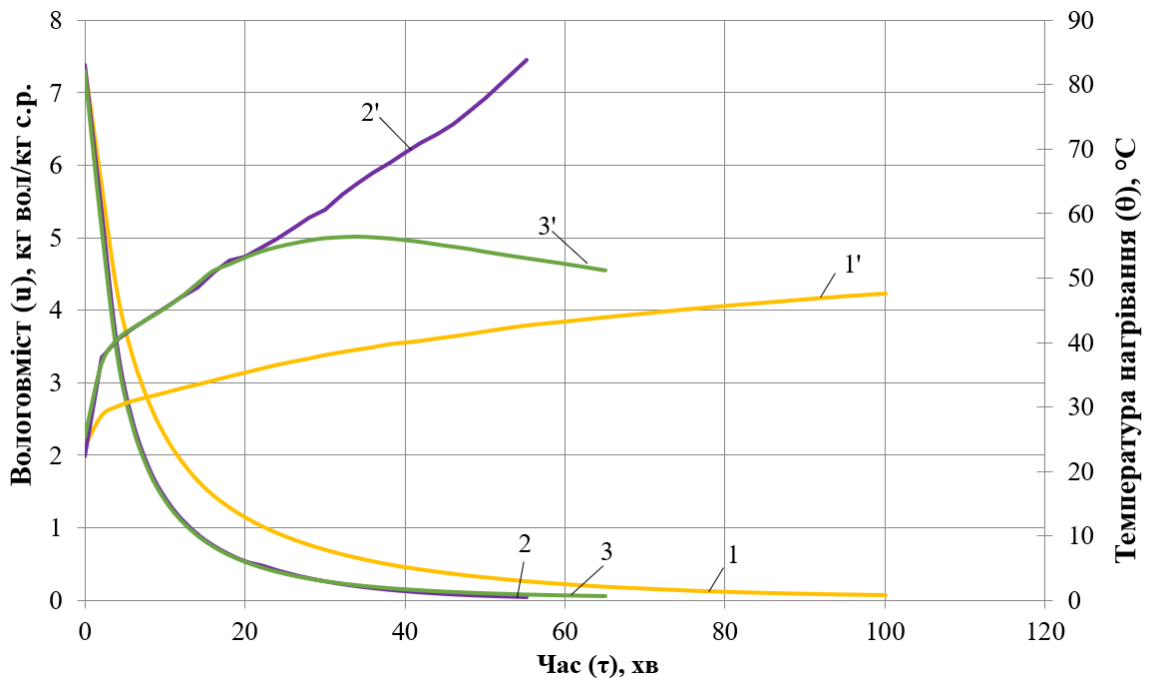


Рис. 3.10. Зміна вологовмісту (1, 2, 3) та температури всередині шару (1', 2', 3') грибів шіітаке у шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,0$  м/с):

1, 1' – 60 °С; 2, 2' – 100 °С; 3, 3' – 100/60 °С

У роботі [118] нами було виконано дослідження грибів шиїтакі. Дослідження сушіння проводили за температури теплоносія 60 °С, 100 °С і ступеневого режиму 100/60 °С. Як видно з рис 3.11 найменша тривалість сушіння за температурним режимом 100 °С і становить 50 хв, що у 2 рази менше за 60 °С. При цьому можна спостерігати потемніння матеріалу, денатурації білків, руйнуванню вітамінів та інших процесів при сушінні режимом 100 °С. Застосування ступеневого режиму 100/60 °С дозволяє зменшити тривалість сушіння у 1,5 разів 60 °С, але колір грибів не темніє і дозволяє зберігати біологічно активні речовини.

Як видно з досліджень вологовміст моркви та грибів шиїтаке знаходиться в межах 7,3 кг води/кг с.р. (88,00% вологості матеріалів). Тому створена суміш на основі моркви та грибів шиїтаке у співвідношенні 1:1 представлені на рис. 3.12.

Як видно з рис. 3.12 тривалість сушіння у суміші при режимі 60 °С становить 115 хв, що у 1,9 рази менше за 100 °С, але при цьому зберігається колір у матеріалі та більшість корисних елементів. При цьому у суміші тривалість порівняно з грибами збільшується у 1,15 раза.

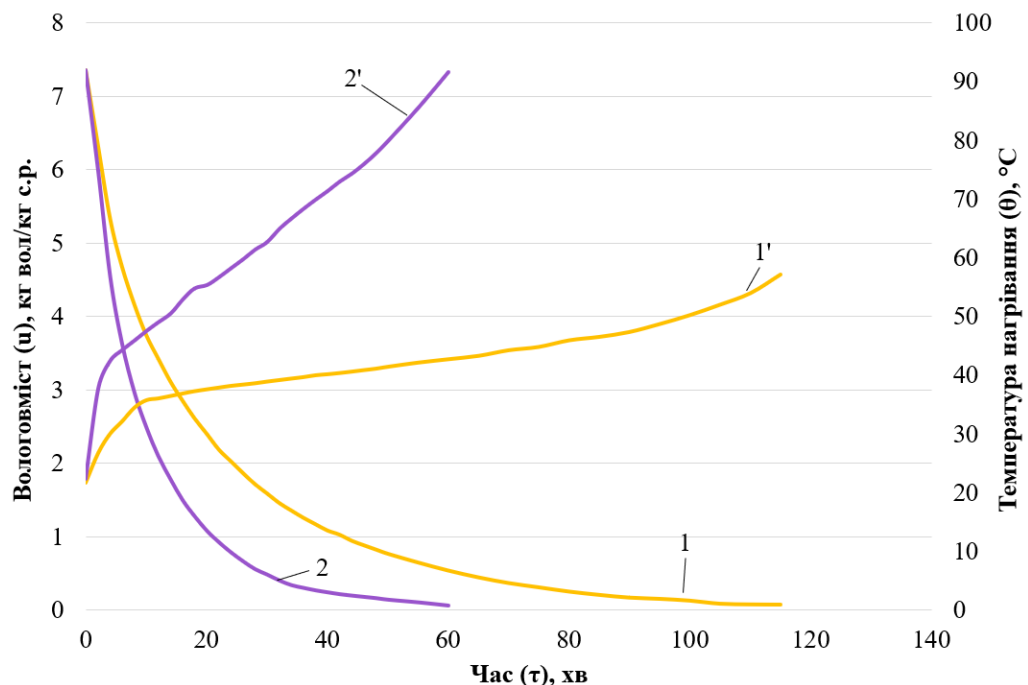


Рис. 3.12. Зміна вологовмісту (1, 2, 3) та температури всередині шару (1', 2', 3') білково-каротинової суміші на основі моркви та грибів в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,0$  м/с): 1, 1' – 60 °С; 2, 2' – 100 °С

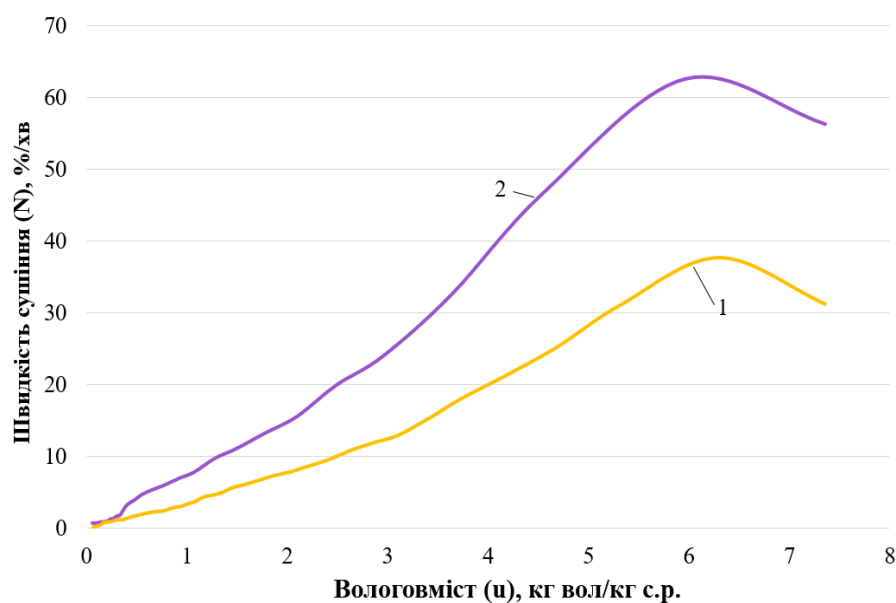


Рис. 3.13. Зміна швидкості сушіння (1, 2) білково-каротинової суміші на основі моркви та грибів в шарі за різних температур теплоносія ( $\delta \approx 10$  мм,  $V=3,0$  м/с): 1 – 60 °C; 2 – 100 °C

На рис. 3.13 представлені криві швидкості сушіння білково-каротинової суміші на основі моркви та грибів в шарі. Як видно з рис. 3.13 максимальне значення швидкості при сушінні морквяно-грибної суміші настає при вологовмісті 5,9-6,3 кг вол./кг с.р..

### 3.4. Дослідження вмісту каротинів у сушеній рослинній сировині

Вміст каротиноїдів в залежності від стану сировини представлено в таблиці 3.2. Як видно з таблиці 3.2 концентрація каротиноїдів в порошках збільшується приблизно у 5 разів, що пояснюється зменшенням вологи та концентрацією сухих речовин. На рис. 3.14 представлено зміну каротиноїдів у каротинової сировині за різних температур теплоносія. Як видно з рис. 3.14, сушіння гарбуза та моркви при високих температурах зменшує зберігання каротиноїдів у сушеній продукції порівняно з 65-70 °C у 4,1-4,3 рази.

Порівнюючи якісні показники композиційних антиоксидантних сумішей за вмістом каротиноїдів, можна зробити висновок, що вони зберігають краще каротиноїди, ніж морквяний порошок після гігротермічної обробки на 6,3 – 9,6% (табл. 3.3).

Таблиця 3.2. Вміст каротиноїдів в залежності від виду каротиновмісної сировини

Вид сировини	Сировина	Волога, %	Сума каротиноїдів, мг %
Морква	Свіжа морква	85,0	19,2
	Порошок із моркви	4,0	120,7
Гарбуз	Свіжий гарбуз	86,3	2,6
	Порошок із гарбуза	8,0	19,5

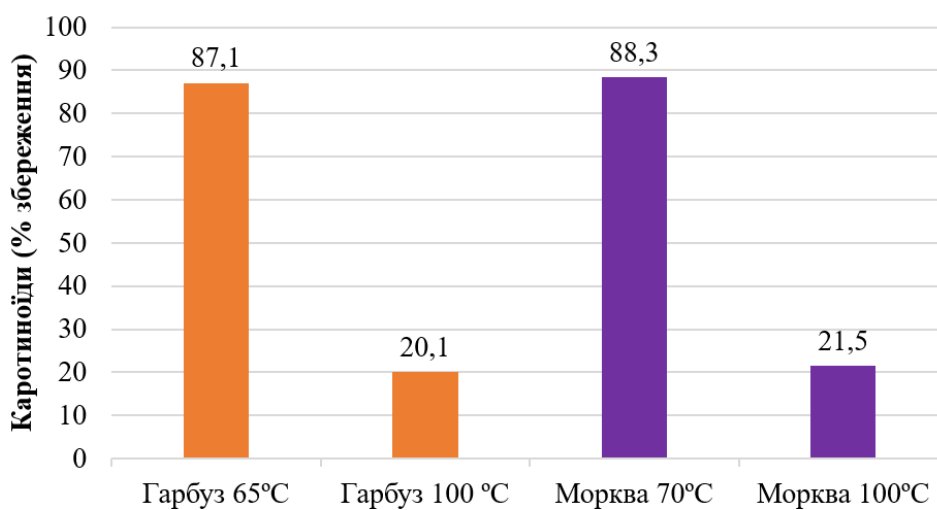


Рис. 3.14. Зміна каротиноїдів у каротиновмістній сировині за різних температур теплоносія

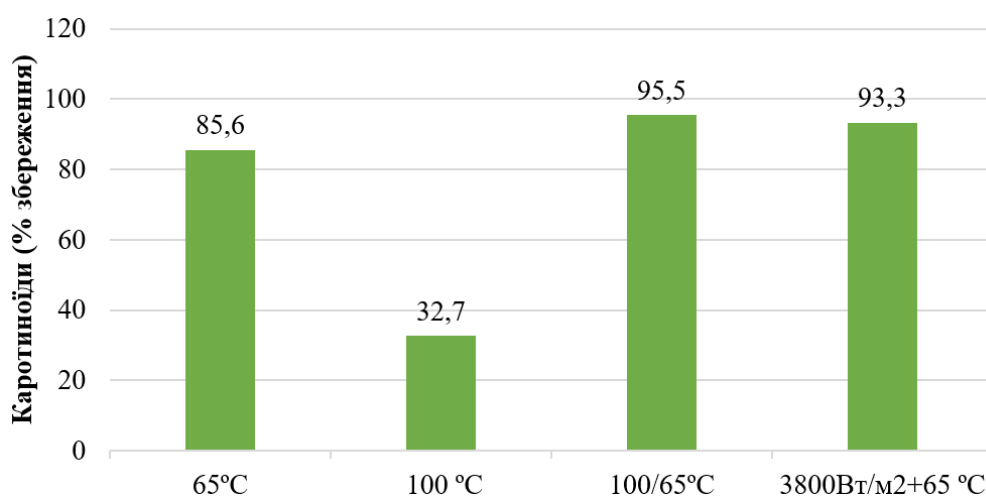


Рис. 3.15. Зміна каротиноїдів у гарбузово-хурмяній суміші за різних температур теплоносія

На рис. 3.15 представлено зміну каротиноїдів у гарбузово-хурмянній суміші за різних температур теплоносія. Як видно з рис. 3.15, сушіння при температурі 100 °С зменшує зберігання каротиноїдів у сушеній продукції порівняно з 65°C у 2,6 рази. При цьому застосування комбінованого та ступеневого режиму дозволяють збільшити кількість збережених каротиноїдів у 1,1 рази.

Проведені дослідження впливу температури теплоносія на збереження каротиноїдів показало, що найбільш оптимальна температура сушіння морквяно-селерної суміші, виходячи з якісних характеристик, складає 70°C (табл. 3.3).

Таблиця 3.3. Вплив температури теплоносія на збереження каротиноїдів в антиоксидантних сумішах на основі моркви

Назва антиоксидантного порошку	Температура теплоносія, °С	Каротиноїди (% збереження)
Морквяний (після гігротермічної обробки)	60	84,1
	<b><u>70</u></b>	<b><u>88,3</u></b>
	80	84,6
	100	21,5
Морквяно-селерний	60	87,7
	<b><u>70</u></b>	<b><u>95,6</u></b>
	80	91,1
	100	33,2

Збільшення температури теплоносія до 80°C зменшить тривалість сушіння на 10 хв., при цьому також зменшується збереження каротиноїдів в порівнянні з температурою 70°C на 4,5%. Підвищення температури до 100°C призводить до істотного зменшення каротиноїдів і становить 33,2%.

На рис. 3.17 представлено зміну каротиноїдів у морквяно-селерній суміші за різних температур теплоносія. Як видно з рис. 3.17, сушіння при температурі 100 °С зменшує зберігання каротиноїдів у сушеній продукції порівняно з 60°C у 3,9 рази. Сушіння при 70 °С дозволяє збільшити збереження каротиноїдів порівняно з 60°C у 1,05 рази. При цьому застосування ступеневого режиму дозволяють збільшити кількість збережених каротиноїдів у 1,12 рази.

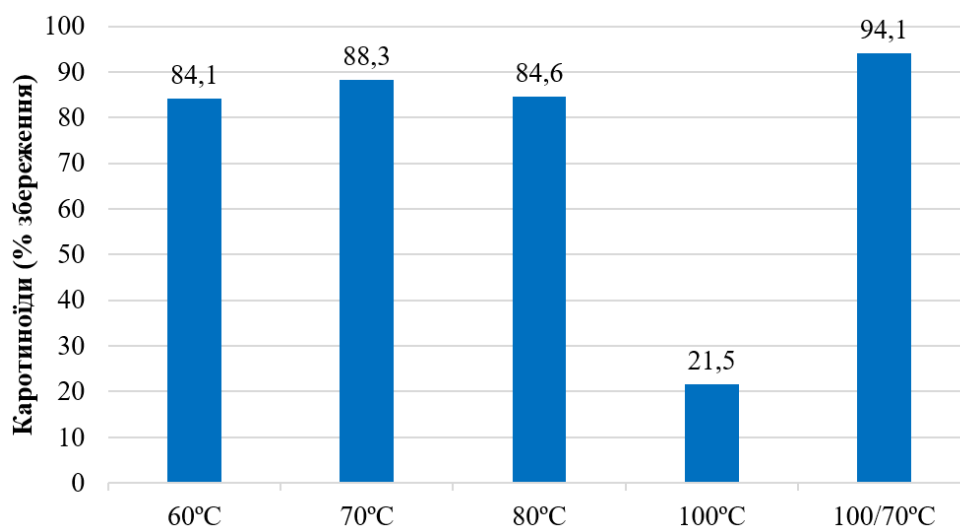


Рис. 3.17. Зміна каротиноїдів у морквяно-селерній суміші за різних температур теплоносія

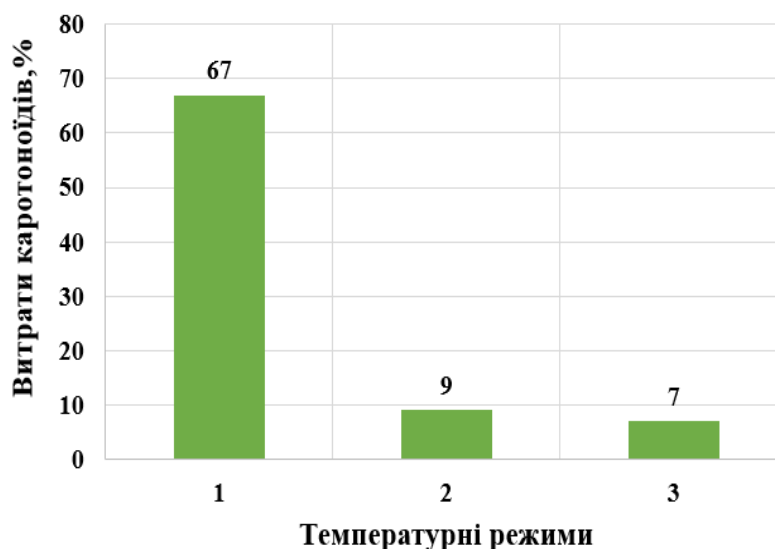


Рис. 3.18. Втрати каротиноїдів у морквяно-селерної суміші в залежності від режиму сушіння : 1 – 100 °С; 2 – 100/70°С; 3 – 70°С

Найкращі результати збереження каротиноїдів отримані при тепловому режиму сушіння 70 °С і становлять 90 – 93%. Ступінчастий режим сушіння забезпечує збереження каротиноїдів на рівні 87 – 90%. При цьому антиоксидантна суміш на вигляд за кольором не відрізняється від початкової сировини. Навіть різниця в 3% збереження каротиноїдів між режимами 70 та 100/70°С, все ж таки надає перевагу ступінчатому режиму з огляду на значну інтенсифікацію процесу сушіння (рис. 3.18).

### 3.5. Дослідження регідраційних властивостей сухих каротиновмістних матеріалів

У переважній більшості випадків порошкоподібні харчові продукти призначені для регідрації водою або, відповідно, водною рідиною. Ідеальний порошок повинен швидко та ретельно змочуватися, занурюватися в рідину, а не плавати на поверхні, та диспергуватися/розчинятися протягом короткого періоду часу без утворення грудочок. Такої ідеальної поведінки важко досягти, оскільки виробничі процеси зазвичай дають частинки досить малого розміру та/або несприятливої структури [112].

Важливими умовами, які висуваються до сухих порошкоподібних сумішей є їх відновлюваність у воді та коефіцієнт набухання, в тому числі й відсутність утворення грудок при контакті з водою.

Коефіцієнт набухання, є важливим при визначенні властивостей сушених матеріалів. Тому були виконанні дослідження по визначенню коефіцієнту набухання при температурі води 20, 45, 60 та 80 °С для ступеневого режиму сушіння.

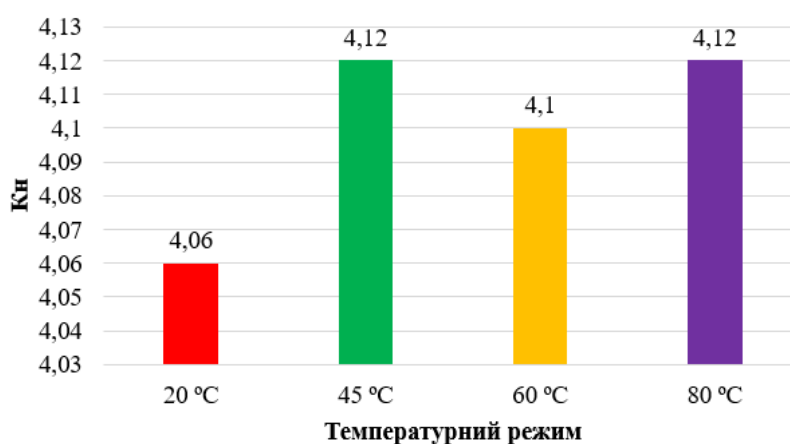


Рис. 3.19. Зміна коефіцієнта набухання білково-каротиновмісної суміші

Результати досліджень представлені на рис. 3.19. Як видно з рисунку коефіцієнт набухання для ступеневого режиму при температурі 45 та 80 °С становить 4,12.

При температурі води 20 °С можна спостерігати найнижчий коефіцієнт набухання і становить 4,06.

Визначено час відновлювання каротиновмістних порошків. Результати досліджень представлені на рис. 3.20. Як видно з рис. 3.20 порошок з моркви має вищий час відновлювання ніж суміші та становить 14 секунд. У морквяно-соєвому час відновлення становить 9 сек та більший за морквяно-селерний з часом 6 сек.

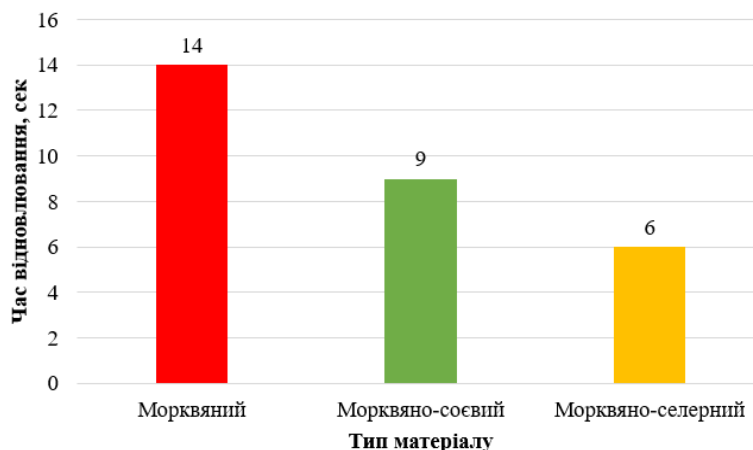


Рис. 3.20. Результати відновлювання каротиновмістних порошків

Тому створення сумішей дозволяє зменшити час відновлення, що свідчить про більш інтенсивне проникнення води до матеріалу.

Виконані дослідження по визначеню водутримуючої залежності (ВУЗ) для каротиновмістних матеріалів результати який представлено на рис. 3.14.

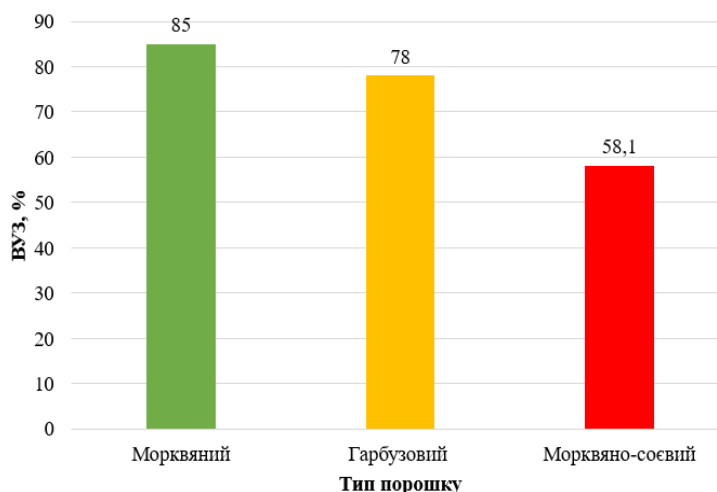


Рис. 3.21. Водутримуюча залежність каротиномістних матеріалів

Як видно з рис. 3.21 у монокорошках водутримуюча здатність вища за суміш та становить для морквяного 85% та гарбузового 78%. Водутримуча залежність у морквяно-соєвому становить 58,1%.

### 3.6. Розрахунок кінетики тепловологообміну під час сушіння каротиновмісної рослинної сировини

Як бачимо, використання високотемпературного теплоносія з метою інтенсифікації процесу обмежується специфікою дослідного матеріалу. Характер процесу сушіння визначається фізико-хімічними та структурно-механічними властивостями матеріалу, які впливають на форму зв'язку вологи з ним, дифузійною природою явища, а також способом підведення теплоти, інакше закономірністю взаємодії тіла з навколишнім середовищем. Тому для опису процесу сушіння використовують емпіричні залежності. Найбільш схожим методом розрахунку кінетики сушіння, є метод заснований на вивченні загальних закономірностей процесу, що зближує теорію і практику сушіння [27, 120].

Для розрахунку кінетики тепловологообміну при сушінні рослинних матеріалів нами використано теоретичний метод В.В. Краснікова [27, 120].

Аналіз багатьох експериментальних даних з кінетики сушіння різних матеріалів різними методами сушіння, отриманих вітчизняними та закордонними дослідниками, дозволив встановити наступну закономірність: при сушінні визначеного матеріалу, який має початковий вологовміст, при будь-якому режимі сушіння зберігається незалежною величина  $N\tau$ , яка відповідає даному проміжному вологовмісту [27, 120].

В математичній формі запису ці закономірності представлені виразом:

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \dots = N_m\tau_m = (N\tau)_u = const, \quad (3.1)$$

де  $N_1, N_2, \dots, N_m$  – швидкість сушіння в перший період (при відсутності першого періоду – максимальна швидкість сушіння) при різних режимах;  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$  – проміжний час сушіння, коли вологовміст змінюється від початкового  $u_n$  до заданого проміжного  $u$ .

Змінна  $N\tau$  є стійким комплексом величин, характерних для процесу сушіння, тому у відповідності з основами теорії подібності і аналізу розмірностей [27, 120] величину  $N\tau$  назвали узагальненою змінною або узагальненим часом сушіння.

В частковому випадку для першого періоду сушіння:

$$(N\tau)_u = u_{\pi} - u. \quad (3.2)$$

В загальному випадку для другого періоду сушіння:

$$(N\tau)_u = u_{\pi} - u + u_x = const, \quad (3.3)$$

де  $u_x$  – величина, яка залежить від властивостей матеріалу, визначається з експерименту.

Оперування узагальненим часом сушіння надає дослідженню процесу сушіння узагальнюючий характер. Багато різних комбінацій  $N$  і  $\tau$  дають однакове значення. Тобто фіксоване значення  $N\tau$  відповідає не одному визначеному набору основних величин, а великій кількості подібних наборів. Тому дослідження процесів сушіння з використанням  $N\tau$  аналізують не окремі часткові випадки, а різні випадки сушіння в поєднанні з деякими узагальненнями параметрів процесу. Більше значення  $N$  призводить до меншого часу сушіння  $\tau$  для досягнення заданого вологовмісту  $u$ , але для всіх можливих  $N$  значення  $N\tau$  залишається незмінним для цього  $u$ , залежно від (3.1) або (3.3). З наведеного вище витікає, що якщо по вісі абсцис відкладати узагальнюючий час  $N\tau$ , а по вісі ординат – величину проміжного вологовмісту  $u$ , то всі експериментальні криві сушіння даного матеріалу, отримані при одній початковому вологовмісту  $u_n$ , але при різних режимах (сімейство кривих), перенесені в нову систему координат  $u - N\tau$ , з'єднуються в єдину криву, названу узагальненою кривою кінетики сушіння.

На рис. 3.22 представлені узеленена крива сушіння білково-каротиновмістної сировини на основі моркви та сої. При побудові цих кривих були узагальнені дані, представлені в підрозділі 3.3.2 і отримані в експериментах з різними температурними режимами при цьому враховувались швидкість та вологовміст теплоносія, шару матеріалу.

З рис. 3.22 видно, що на початку процесу при високому вологовмісту матеріалу різні режими представлені точками та розташовуються поблизу та на

узагальненій кривій. Зі зменшення вологовмісту в матеріалі можна спостерігати розкидання точок в межах похибки 5%. В загалом можна спостерігати, що узагальнена крива має точний збіг з експериментальними даними.

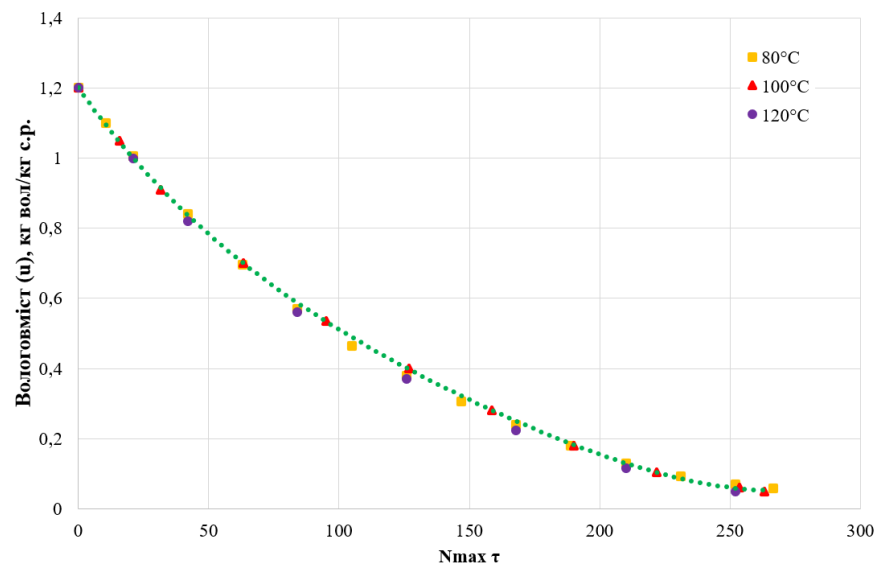


Рис. 3.22. Узагальнена крива кінетики сушіння білково-каротиновмісної сировини від температури теплоносія

Криві сушіння та швидкості сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл, не дивлячись на різноманіття режимів сушіння, а також відмінність в механізмах перенесення вологи і тепла в широкому діапазоні температур теплоносія мають в основному однаковий характер. На кривих сушіння виділяють дві основних ділянки або періоду, що відокремлені вертикальною лінією: перший період – період сталої швидкості; другий – період спадної швидкості. Ці ділянки розділяються критичним вологовмістом ( $u_k$ ), який визначається по точці зламу прямої (першого періоду) [121]. Перший період на кривих можна не завжди спостерігати, тому другий період також може ділитися на дві або більше частин, виявленими критичними точками  $u_{k1}$ ,  $u_{k2}$ , ...  $u_{kt}$ . Відмінність виявляється лише в кількісному відношенні. Подібна аналогія спостерігається, також, при порівнянні кривих сушіння та швидкості сушіння визначеного матеріалу різними методами сушіння, тобто, відмінність в режимах і методах сушіння не призводить до змін виду кривих сушіння і швидкості сушіння даного матеріалу. При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді, у зв'язку з

викладеним, обов'язково повинні враховуватися величини емпіричних коефіцієнтів, зумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти, як правило, визначаються безпосередньо, з досліду по сушінню даного матеріалу.

Відносний коефіцієнт сушіння  $\chi$  визначається лише формулою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки. Узагальнені криві кінетики сушіння, які побудовані у напівлогарифмічних координатах, дозволяють визначити відносні коефіцієнти сушіння другого періоду.

Відносні коефіцієнти сушіння визначаються з узагальненої кривої за наступними виразами:

- при сушінні тільки у другому періоді

$$\chi_2 = \frac{\lg \lg (u_{\text{п}} - u_{\text{р}}) - \lg \lg (u_{\text{к1}} - u_{\text{р}})}{N_{\text{max}} \tau_1} \quad (3.4)$$

- при наявності першого періоду сушіння

$$\chi_2 = \frac{\lg \lg (u_{\text{к1}} - u_{\text{р}}) - \lg \lg (u_{\text{к2}} - u_{\text{р}})}{N_{\text{max}} \tau_2} \quad (3.5)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg \lg (u_{\text{к2}} - u_{\text{р}}) - \lg \lg (u_{\text{к3}} - u_{\text{р}})}{N_{\text{max}} \tau_3} \quad (3.6)$$

$$\chi_4 = \frac{\lg \lg (u_{\text{к3}} - u_{\text{р}}) - \lg \lg (u_{\text{к}} - u_{\text{р}})}{N_{\text{max}} \tau_4} \quad (3.7)$$

де  $u_{\text{п}}$  – початковий вологовміст матеріалу, кг вол/кг с.р.;  $u_{\text{к1}}$ ,  $u_{\text{к2}}$ ,  $u_{\text{к3}}$  – вологовміст матеріалу в точках  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , кг вол/кг с.р.;  $u_{\text{р}}$  – рівноважний вологовміст матеріалу, кг вол/кг с.р.;  $u_{\text{к}}$  – кінцевий вологовміст матеріалу, кг вол/кг с.р.;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  – тривалість першої, другої, третьої та четвертої частини процесу сушіння, хв.

Проводимо побудову в системі напівлогарифмічних координатах, де по осі абсцис відкладено узагальнений час сушіння  $N_{\text{max}} \tau$ , а по осі ординат – логарифм поточного вологовмісту  $u$  для визначення відносних коефіцієнтів сушіння білково-каротиновмістної сировини (рис. 3.23). Побудовані узагальнені криві сушіння білково-каротиновмістної сировини, які представлені на рис. 3.23 показують, що

процес сушіння в другому періоді та складається з чотирьох частин з критичними точками  $K_1$ ,  $K_2$  та  $K_3$ .

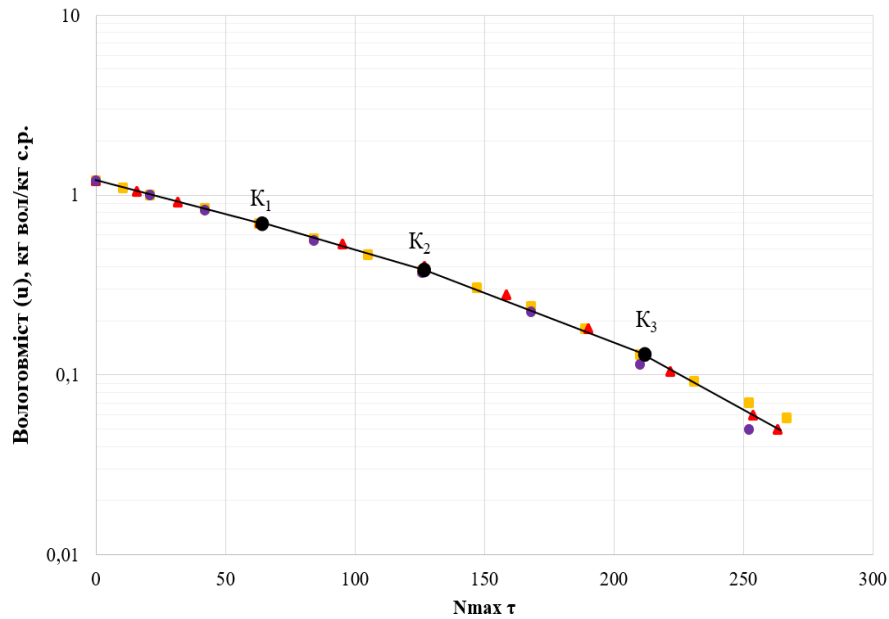


Рис. 3.23. Узагальнені криві сушіння білково-каротиновмістної сировини в напівлогарифмічній системі координат

У зв'язку з тим, що при виконанні досліджень за високих температур рівноважний вологовміст з навколишнім середовищем рівний нулю. Тому для розрахунку використані спрощені формули:

$$\chi_2 = \frac{\lg \lg u_{\text{п}} - \lg \lg u_{K_1}}{N_{\text{max}} \tau_1} \quad (3.8)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg \lg u_{K_1} - \lg \lg u_{K_2}}{N_{\text{max}} \tau_2} \quad (3.9)$$

$$\chi_4 = \frac{\lg \lg u_{K_2} - \lg \lg u_{K_3}}{N_{\text{max}} \tau_3} \quad (3.10)$$

$$\chi_5 = \frac{\lg \lg u_{K_3} - \lg \lg u_{\text{к}}}{N_{\text{max}} \tau_4} \quad (3.11)$$

Розраховані відносні коефіцієнти сушіння за формулами (3.8) – (3.11) та за графіком узагальнених кривих сушіння в напівлогарифмічній системі координат рис. 3.23 внесені до таблиці 3.3. В залежності від інтервалу вибраної вологості розраховані коефіцієнти відповідно будуть різних величин.

Таблиця 3.3. Відносні та кінетичні коефіцієнти сушіння білково-каротиновмістної сировини

Діапазон критичних вологовмістів, кг вол/кг с.р	Відносні коефіцієнти сушіння			
	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
1,20 – 0,70	0,0037			
0,70 – 0,37		0,0022		
0,37 – 0,13			0,0022	
0,13 – 0,05				0,0017

Проводячи графічне диференціювання узагальненої кривої кінетики сушіння, представленої на рис. 3.22 отримано узагальнену криву швидкості сушіння рис. 3.24, яка визначається наступним виразом:

$$N^* = \left| \frac{du}{d\tau} \right| \div N = \frac{1}{N} \left| \frac{du}{d\tau} \right| = tg(u, N\tau) = f(u). \quad (3.12)$$

Для опису узагальненої кривої швидкості сушіння використовуємо для розгляду, так звану відносну швидкість сушіння, яка наведена у формулі (3.12). Величина відносної швидкості сушіння при заданому вологовмісті, яка знаходиться з узагальненої кривої сушіння  $u - N\tau$ , чисельно рівна тангенсу кута нахилу кривої точки  $u$  до вісі  $N\tau$ , тобто знаходиться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння (3.12).

Величина  $N^*$  не залежить від режиму сушіння і для конкретного матеріалу при даному методі сушіння є лише функцією вологості.

З рис. 3.24 видно, що узагальнені криві швидкості сушіння представлені плавними нахильними кривими. З метою описання залежностей  $N^*$  від  $u$  узагальнені криві швидкості сушіння побудовані в напівлогарифмічних координатах.

З рис. 3.25 видно, що в напівлогарифмічних координатах узагальнена швидкість сушіння представлена собою ломаною лінією, яка складаються з

чотирьох прямих. Закон зміни при переході від однієї частини до другої частини змінюється, що вказує на відмінність в кінетики та динаміки сушіння в різних частинах процесу сушіння.

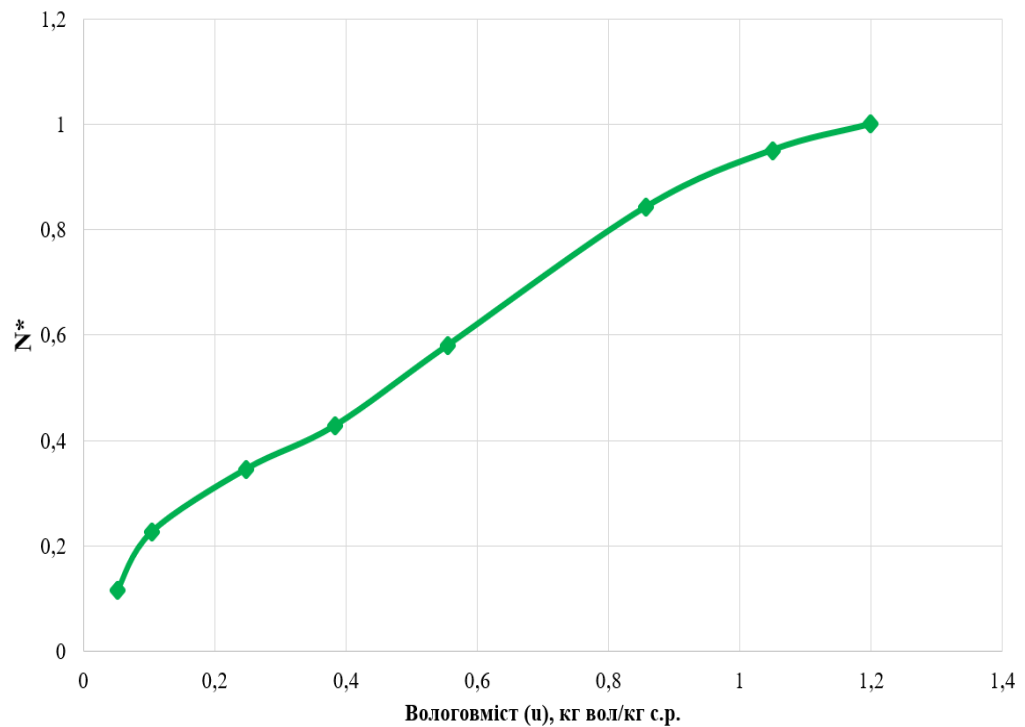


Рис. 3.24. Узагальнені криві швидкості сушіння білково-каротиновмістної сировини

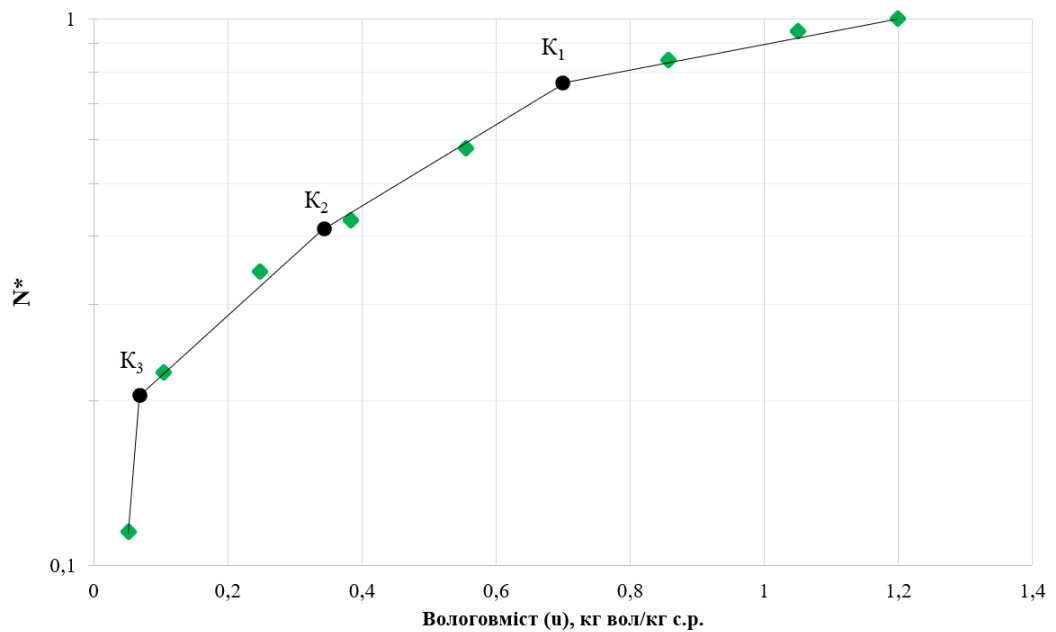


Рис. 3.25. Узагальнені криві швидкості сушіння білково-каротиновмістної сировини в напівлогарифмічних координатах

Швидкість сушіння у будь-який момент можна визначити по величині  $N_{max}$  в перший період сушіння (або максимальної швидкості сушіння) для різних режимів та величини  $N^*$  для даного вологовмісту (або часу сушіння) за формулою:

$$\frac{du}{d\tau} = N^* \cdot N_{max}. \quad (3.13)$$

Для розрахунку загальної тривалості процесу сушіння визначають час кожного періоду процесу. Як зазначалося раніше, перший період сушіння відсутній, тому рівняння кривої сушіння описується рівняннями другого періоду (рис. 3.23), який складається з чотирьох частин:

$$\lg \lg u = \lg \lg u_{\Pi} - k_1 \tau_1, \quad (3.14)$$

вологовміст змінюється в межах  $u_{\Pi} \geq u \geq u_{K1}$ , час відраховується від початку першої частини другого періоду;

$$\lg \lg u = \lg \lg u_{K1} - k_2 \tau_2, \quad (3.15)$$

вологовміст змінюється в межах  $u_{K1} \geq u \geq u_{K2}$ , час відраховується від початку другої частини другого періоду;

$$\lg \lg u = \lg \lg u_{K2} - k_3 \tau_2, \quad (3.16)$$

вологовміст змінюється в межах  $u_{K2} \geq u \geq u_{K3}$ , час відраховується від початку третьої частини другого періоду;

$$\lg \lg u = \lg \lg u_{K3} - k_4 \tau_3, \quad (3.17)$$

вологовміст змінюється в межах  $u_{K3} \geq u \geq u_K$ , час відраховується від початку четвертої частини другого періоду.

Коефіцієнти  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  і  $k_4$  – називають коефіцієнтами сушіння, які чисельно рівні тангенсам кутів нахилу відрізків прямих до вісі  $\tau$  в напівлогарифмічному анаморфозі. Величина цих коефіцієнтів залежить від роду вологого матеріалу, його властивостей, режиму і методу сушіння.

Вплив режиму на коефіцієнти  $k_1, k_2, k_3$  і  $k_4$  може бути відображено величиною  $N_{max}$  – максимальною швидкістю сушіння матеріалу при даному режимі в перший період сушіння (або при відсутності першого періоду – максимальною швидкістю сушіння при даному  $u_n$ ). Це можливо тому, що  $N_{max}$  є узагальненою величиною, в якій відображено вплив всіх параметрів, які впливають на швидкість сушіння даного матеріалу і розповсюджується на весь другий період сушіння. Відповідно до цього:

$$k_1 = \chi_2 N_{max}. \quad (3.18)$$

$$k_2 = \chi_3 N_{max} \quad (3.19)$$

$$k_3 = \chi_4 N_{max}. \quad (3.20)$$

$$k_4 = \chi_5 N_{max}. \quad (3.21)$$

Загальна тривалість процесу сушіння  $\tau_T$  (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді та другому, або за відсутності першого тільки другому, який складається з двох або більше частин:

$$\tau_T = \tau_I + \tau_{II}. \quad (3.22)$$

Виходячи з відсутності першого періоду, тривалість складається з 4 частин другого: 1-й  $\tau_1$ , 2-й  $\tau_2$ , 3-й  $\tau_3$  та 4-й  $\tau_4$ :

$$\tau_T = \tau_{II} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4. \quad (3.23)$$

Вирішивши рівняння (3.14) – (3.17) відносно  $\tau$  і використовуючи співвідношення (3.18) – (3.21) отримують вираз для розрахунку тривалості сушіння в кожній частині процесу:

$$\tau_1 = \frac{1}{\chi_2 N_{max}} \lg \frac{u_n}{u_{K1}}. \quad (3.24)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{\chi_3 N_{max}} \lg \lg \frac{u_{K1}}{u_{K2}}. \quad (3.25)$$

$$\tau_3 = \frac{1}{\chi_4 N_{max}} \lg \lg \frac{u_{K2}}{u_{K3}}. \quad (3.26)$$

$$\tau_3 = \frac{1}{\chi_5 N_{max}} \lg \lg \frac{u_{K3}}{u_K}. \quad (3.27)$$

Відповідно до (3.23) загальна тривалість процесу сушіння білково-каротиновмісної сировини визначається за формулою:

$$\tau_T = \frac{1}{N_{max}} \left( \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{u_{п}}{u_{K1}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \lg \frac{u_{K1}}{u_{K2}} + \frac{1}{\chi_4} \lg \lg \frac{u_{K2}}{u_{K3}} + \frac{1}{\chi_5} \lg \lg \frac{u_{K3}}{u_K} \right). \quad (3.28)$$

У формулі (3.28) величини критичних вологовмістів  $u_{K1}$ ,  $u_{K2}$ ,  $u_{K3}$  та відносні коефіцієнти  $\chi_2$ ,  $\chi_3$ ,  $\chi_4$ ,  $\chi_5$  знаходяться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння в напівлогарифмічних координатах. Множник, який стоїть в дужках у формулі (3.28) постійний для конкретного матеріалу при незмінних величинах початкового та кінцевого вологовмісту та не залежить від режиму сушіння. Відповідно, величина  $\tau$  зворотно пропорційний швидкості сушіння в першій період  $N$ , або при його відсутності, максимальній швидкості сушіння в першій частині другого періоду  $N_{max}$ .

Значення вологовмістів в точках  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  та розраховані відносні коефіцієнти сушіння, які представлені у табл. 3.3, дозволили розрахувати загальну тривалість сушіння білково-каротиновмісної сировини:

$$\tau_T = \frac{635,6}{N_{max}}. \quad (3.29)$$

Використовуючи отриману залежність (3.29), можна заздалегідь оцінити тривалість процесу сушіння білково-каротиновмісної сировини при зміні режимів зневоднення.

За результатами кінетики вологообміну легко перейти до розрахунку кінетики теплообміну бінарних сумішей з метою визначення оптимальних режимів

сушіння. Способом графічного диференціювання – кривих  $t-W$  розраховані значення температурного коефіцієнту сушіння та критерію оптимізації сушіння.

Побудовані залежності критерію оптимізації сушіння  $R_b = f(W)$ . Характер їхнього змінювання за різними режимами сушіння виявився аналогічним (рис. 3.26).

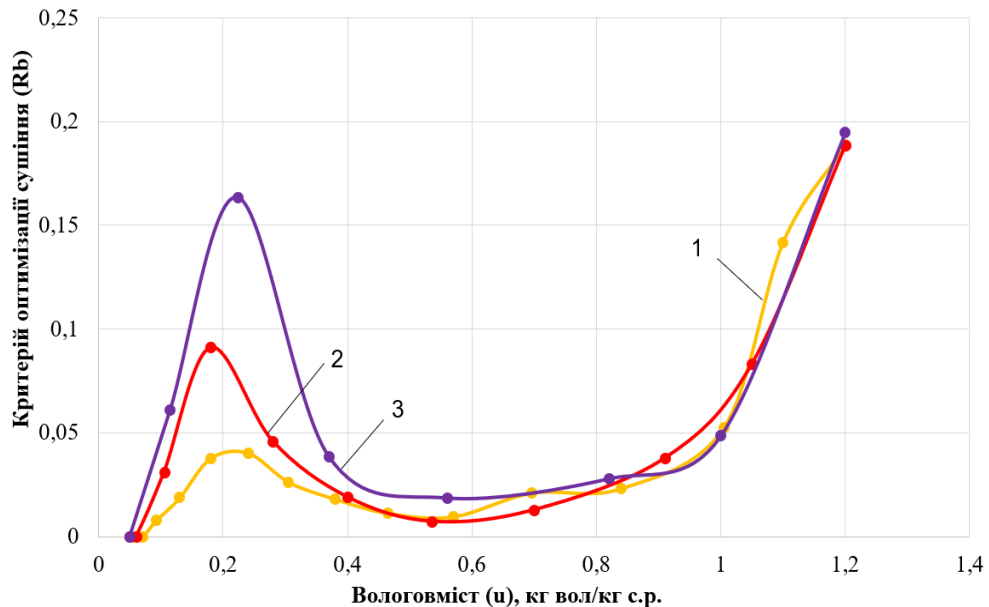


Рис. 3.26. Зміна критерію оптимізації сушіння в процесі зневоднення білково-каротиновмісної суміші:  $V=3$  м/с;  $d=10$  г/кг сухого повітря; товщина шару  $\delta \approx 10$  мм; співвідношення 1:1; температура теплоносія:

1 –  $t=80$  °C, 2 –  $t=100$  °C, 3 –  $t=120$  °C

Зі зниженням вологовмісту зменшується величина  $R_b$ , тобто тепло під час сушіння у більшій мірі витрачається на випаровування вологи з матеріалу, ніж на його нагрівання. При досягненні критичного вологовмісту  $0,45 \dots 0,55$  кг вол/кг с.р. критерій оптимізації сушіння  $R_b$  починає збільшуватися, що свідчить про те, що більша частина теплоти витрачається на нагрівання матеріалу, а не на випаровування з нього вологи. Ця обставина доводить на необхідність зниження температури теплоносія при досягненні матеріалом критичного вологовмісту  $0,45 \dots 0,60$  кг вол/кг с.р..). При досягненні критичного вологовмісту  $0,4 \dots 0,45$ %, критерій оптимізації  $R_b$  різко збільшується, а значить більше теплоти витрачається на нагрів матеріалу. Сильне зменшення критерію оптимізації сушіння  $R_b$  при

досягненні матеріалу вологовмісту 0,05...0,2 кг вол/кг с.р., говорить про, те що матеріал майже повністю прогрітий, а теплота витрачається на видалення найбільш міцно зв'язаної води. Отже, немає сенсу підтримувати високу температуру теплоносія на останній стадії процесу зневоднення. Обробка експериментальних даних довела, що критерій оптимізації сушіння не залежить від швидкості та вологовмісту теплоносія, а визначається тільки тепловим режимом сушіння.

Відносна узагальнена густина теплового потоку  $q^*$  представлена на рисунку 3.27. Використовуючи залежність

$$qr = q^*/q_0, \quad (3.1)$$

де  $q_0$  – густина теплового потоку на початку процесу сушіння.

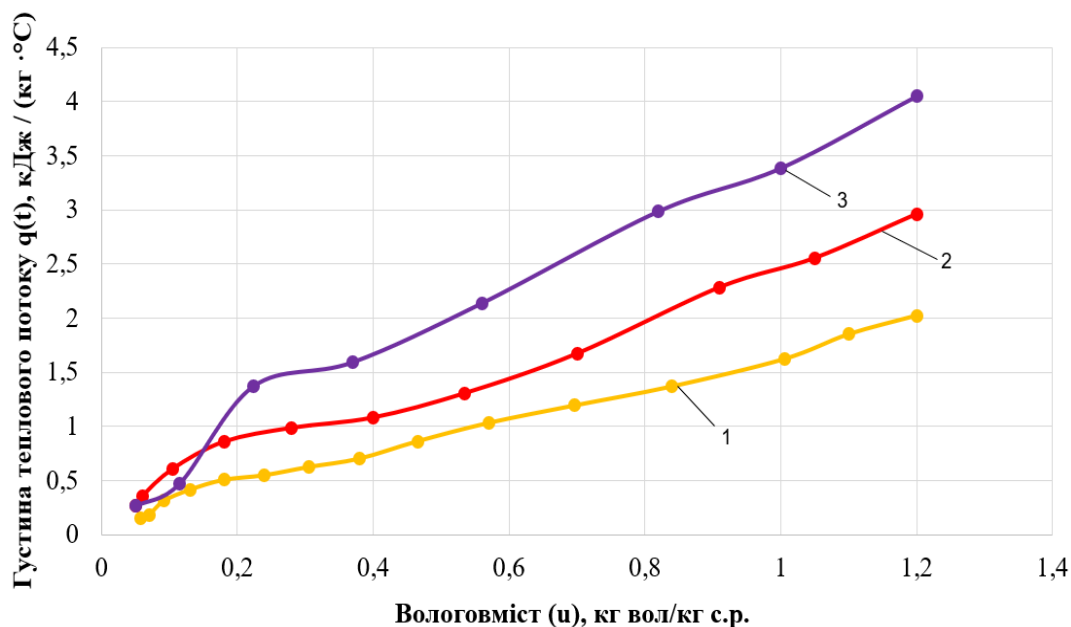


Рис. 3.27. Зміна густини теплового потоку при сушінні білково-критиновмісної суміші:  $V=3$  м/с;  $d=10$  г/кг сухого повітря; товщина шару  $\delta \approx 10$  мм; співвідношення 1:1; температура теплоносія: 1 –  $t=80$  °C, 2 –  $t=100$  °C, 3 –  $t=120$  °C

Розраховані величини густини теплового потоку для різних температурних режимів (рис. 3.28).

Як бачимо, в міру видалення води з матеріалу густина необхідного теплового потоку зменшується. Причому, найбільше зниження відповідає найбільш інтенсивному режиму сушіння. Тобто ще раз підтверджується

необхідність зниження температури теплоносія на кінцевій стадії процесу сушіння, що безумовно позитивно впливає і на якість сушеного матеріалу.

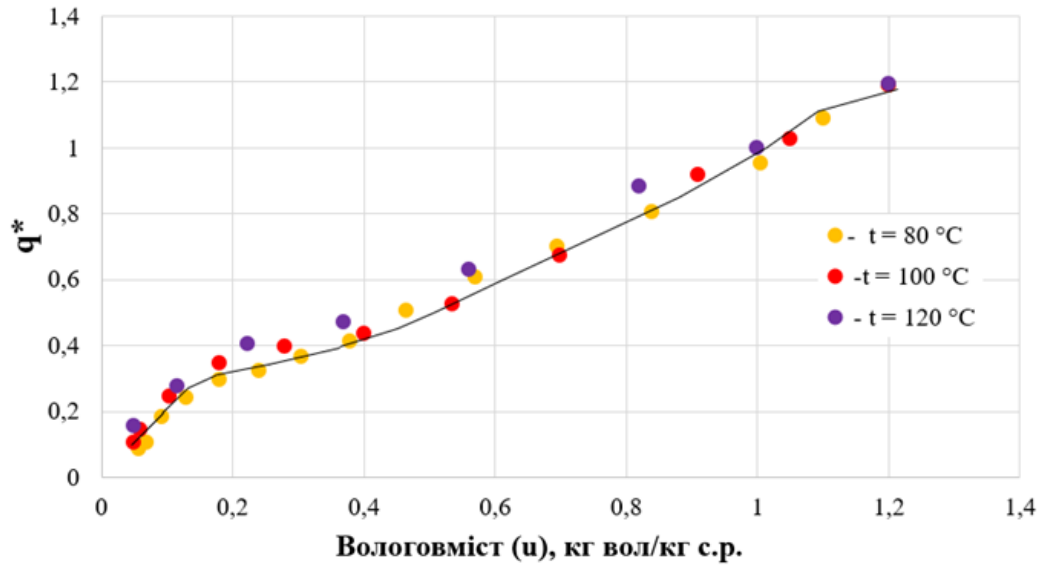


Рис. 3.28. Узагальнена густина теплового потоку

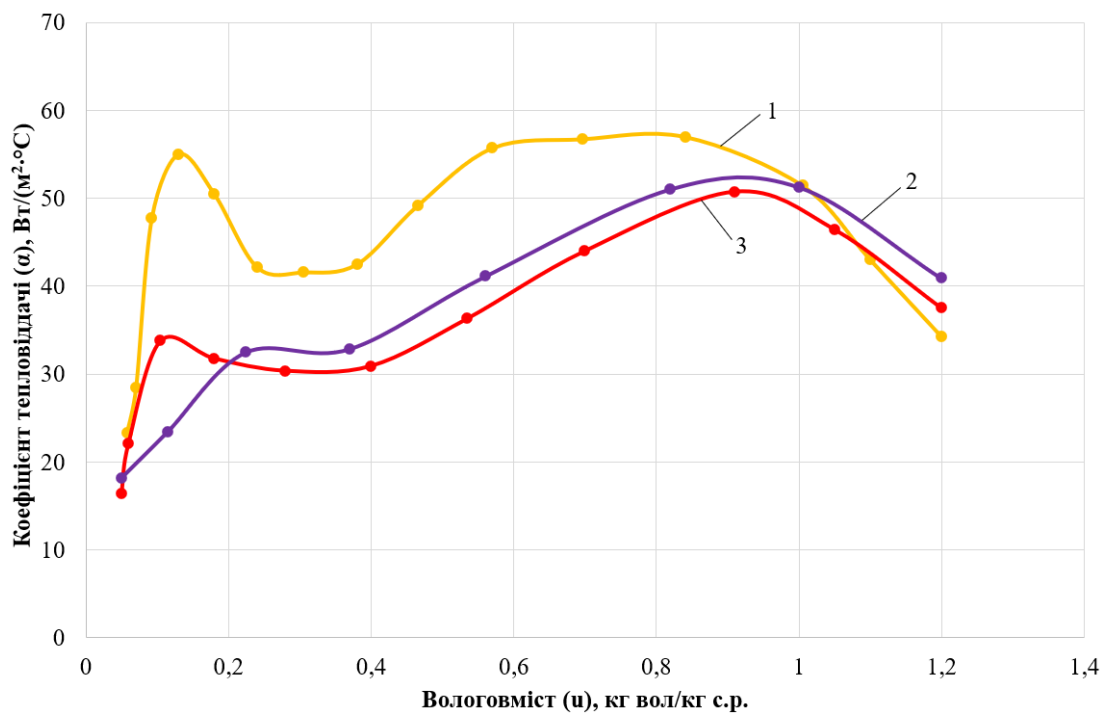


Рис. 3.29. Зміна коефіцієнту тепловіддачі при сушінні білково-котиномісної суміші:  $V=3$  м/с;  $d=10$  г/кг сухого повітря; товщина шару  $\delta \approx 10$  мм; співвідношення 1:1; температура теплоносія: 1 –  $t=80^\circ\text{C}$ , 2 –  $t=100^\circ\text{C}$ , 3 –  $t=120^\circ\text{C}$

На рисунку 3.29 представлена зміна коефіцієнту тепловіддачі при сушінні білково-каротиномісної сировини. Як видно з рис. 3.29 на початку нагрівання

білково-каротиновмісної суміші коефіцієнт тепловіддачі зростає. При досягненні вологовмісту 0,9 кг вол/кг с.р. за температурними режимами 100 °С (крива 2 рис.3.24) та 120 °С (крива 3 рис.3.29) коефіцієнт тепловіддачі починає падати. Це відбувається через збільшення часу нагрівання випаровування води з білково-каротиновмісної суміші зменшувалося, тобто об'ємна витрата гарячого повітряного потоку зменшувалася, а отже, зменшувався коефіцієнт тепловіддачі. За режимом 80 °С (крива 3 рис.3.29) при досягненні вологовмісту 1 кг вол/кг с.р. зростання коефіцієнта тепловіддачі почало сповільнюватися, а після 0,84 кг вол/кг с.р. зміна коефіцієнта тепловіддачі поступово вирівнялася, після чого при 0,6 кг вол/кг с.р. починається падіння. Оскільки на вихідну температуру гарячого повітря впливає зміна вмісту води в білково-каротиновмісної суміші, матеріал переходить в стадію повільного сушіння після стадії швидкісного сушіння, волога в матеріалі випаровується за рахунок тепла, і підвищення температури в матеріалі стає повільним.

За температурним режимом 80 °С та досягненні вологовмісту 0,38 кг вол/кг с.р. падіння коефіцієнту тепловіддачі почало сповільнюватися до 0,25 кг вол/кг с.р., після чого починає знову швидко зростати до 0,13 кг вол/кг с.р., після чого падати. Такий самий характер має режим 100 °С.

Виходячи отриманим результатам, переставленими на рисунку 3.24, сушіння при високих температурах не доцільне, через низький коефіцієнт тепловіддачі між матеріалом та теплоносієм порівняно з режимом 80 °С. Також доцільне використання ступеневих режимів, які дозволять зберігати коефіцієнт тепловіддачі.

### **3.7. Висновки до третього розділу**

1. За результатами проведених досліджень розроблена підготовка сировини до сушіння, за якої зменшуються втрати каротиноїдів до 5-8%.

2. Визначена кінетика процесу сушіння каротиновмісної рослинної сировини, яка дозволила розробити енергоефективні ступеневі режими сушіння, при яких максимальне збереження каротиноїдів у матеріалах.

3. Визначені регідратаційні властивості каротиновмістних матеріалів, які показали доцільність розроблених режимів сушіння.

4. Розраховано кінетику тепловологообміну при сушінні каротиновмістних матеріалів.

5. Визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння білково-каротиновмістної сировини.

6. Із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння розраховані відносні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння білково-каротиновмістної сировини.

7. Розраховано кінетику тепловологообміну при сушінні каротиновмістних матеріалів, яка показала співпадіння теоретичних та експериментальних даних із похибкою не більше 5%.

8. Досліджено зміну критерію оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність запропонованих ступеневих режимів сушки.

9. Досліджено зміну коефіцієнту тепловіддачі при сушінні білково-каротиновмісної суміші.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СУШІННЯ НА ПРОМИСЛОВІЙ СУШАРЦІ

### 4.1. Апробація кінетики сушіння каротиновмісної сировини на основі моркви з використанням удосконаленої сушарки KLARSTEIN

Дослідження, які були проведені на експериментальному стенді по визначенню оптимального режиму сушіння, були апробовані на сушарці KLARSTEIN, що була додатково укомплектована датчиками вологості та температури, модулем для збору та передачі даних з датчиків, системою збереження даних, моніторингу за процесом сушіння та сповіщення.

### 4.2. Опис сушарки KLARSTEIN

Klarstein Fruit Jerky Steel 10, виробництва Німеччини (виробник: Chal-Tec GmbH, Wallstr. 16, Берлін) (рис. 4.1), це зневоднювач напівпрофесійного класу сушарок, які можуть використовуватись на малих об'ємах сировини. З потужністю 1000 Вт, сушарка рівномірно розподіляє гаряче повітря між 10 рівнями за допомогою тихого вентилятора. РК-дисплей дозволяє регулювати температуру на семи рівнях до 68°C. Функція таймера дозволяє встановити бажаний час сушіння з точністю до хвилини. Загальна площа сушіння приблизно 1,5 м<sup>2</sup>. Пристрій виготовлений повністю з матової нержавіючої сталі.

#### *Технічні характеристики установки:*

- Загальні розміри: приблизно 43,5 x 40,5 x 51,5 см
- Розміри нагрівального елемента: приблизно 41,5 x 35,5 x 11,5 см
- Розміри сушильної камери: приблизно 41,5 x 39 x 39,5 см
- Розміри передньої панелі: приблизно 43,5 x 38 x 1,5 см
- Площа для сушіння: приблизно 40 x 36 см
- Відстань між рівнями сушіння: приблизно 2,5 см
- Вага: приблизно 14,1 кг
- Матеріал корпусу: листована нержавіюча сталь
- Матеріал сушарки: хромоване залізо, можна мити в посудомийній машині

- Джерело живлення: 220-240 В~ / 50-60 Гц
- Потужність 1000 Вт



Рис. 4.1. Вигляд сушарки KLARSTEIN

На рис. 4.1 (зліва - на право) представлено:

- 1) зовнішній вид та габаритні розміри;
- 2) камера сушіння та блок сушіння який складається із вентилятора, датчика температури, нагрівача та блока керування;
- 3) вид зверху, на якому видно щит керування сушаркою.

#### ***Характеристики сушарки KLARSTEIN:***

- вимикач увімкнення/вимкнення на верхній панелі пристрою;
- знімний задній вентилятор із тихою роботою для рівномірного розподілу тепла;
- також підходить для освіження випічки, підйому тіста або приготування ласощів для домашніх тварин;
- 5 рівнів сушіння з грубою сіткою (2,2 x 2,2 см) та 5 рівнів сушіння з дрібною сіткою (7 x 7 мм);
- фронтальна панель з нержавіючої сталі для закриття сушильної камери для ще кращої продуктивності сушіння;
- діапазон температур: до 68 °с, регульований на 7 рівнях;
- таймер: регульований по хвилинах до 15 годин;
- рк-дисплей;
- просте керування завдяки 5-кнопковому керуванню;

- частково розбирається для легкого очищення;
- знімний нагрівальний елемент;
- гумові ніжки.



Рис. 4.2. Блок управління сушарки KLARSTEIN: 1 – таймер; 2 – налаштування температури; 3 – кнопка вмикання

На рис. 4.2. переставлений блок управління сушаркою KLARSTEIN. На щиті керування сушаркою (рис. 4.2) налаштовується час сушіння (1), та температура теплоносія (2).

### 4.3. Опис удосконалення сушарки KLARSTEIN та процесу сушіння моркви

Описана сушильна установка у розділі 4.3. була вдосконалена:

- додатковими датчиками температури, вологи, тиску (тензодатчик);
- модулем збору та обробки даних з датчиків (плата на базі ESP32 S3);
- системами обробки, збереження даних, моніторингу за процесом сушіння та нотифікації за критеріями;
- міні комп'ютером Raspberry 4, на якому розгорнута інфраструктура програмного забезпечення.

На схемі, яка представлена на рис. 4.3, показана камера сушарки (1), вентилятор з нагрівачем (2), датчик температури та вологості теплоносія SHT20 (3), датчик температури матеріалу DS18B20 (4), лоток (5), тензодатчик (6), який вимірює зміну ваги матеріалу під час сушіння, міні комп'ютер Raspberry Pi (7), модуль збору (8), конвертації та передачі даних датчиків.

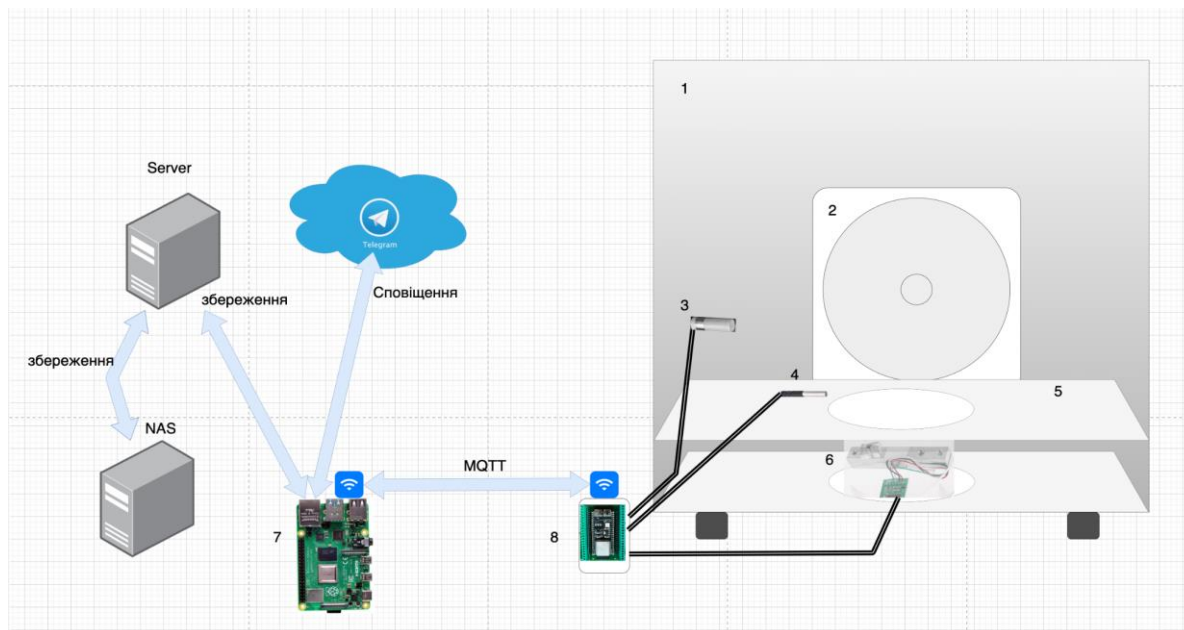


Рис. 4.3. Схема експериментального конвективного стану для сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів: 1 – сушильна камера сушарки; 2 – електричні нагрівачі та вентилятор; 3 – датчик вологості та температури середовища і камері; 4 – датчик температури матеріалу; 5 – піддон; 6 – тензодатчик (ваги); 7 – міні комп'ютер Raspberry; 8 – модуль збору, конвертації та передачі даних датчиків

Усі датчики, які встановлені на установці, під'єднані до спеціального модуля, який запрограмований на:

- 1) створення WiFi з'єднання до мережі;
- 2) зчитування даних датчиків;
- 3) формування повідомлення;
- 4) публікацію повідомлення у топик через мережевий протокол MQTT.

WiFi мережа створена в Raspberry Pi, але може бути створена WiFi Router-ом. Завдяки цьому дані з датчиків безпосередньо потрапляють у Raspberry Pi для подальшої обробки.

Після вмикання міні комп'ютера (7) та модуля (8) дані з датчиків починають записуватись у базу даних, та за допомогою сервісу Grafana їх можна спостерігати онлайн. Потім порожній піддон (5) разом з датчиком (4) розміщують на вагах (6). Для того щоб вимірювати тільки вагу матеріалу, натискаючи на Reset на модулі (8)

ми калібруємо ваги, віднімаючи автоматично тару (піддон та датчики). Після калібрації вагів на графіку в Grafana вага буде близькою до нуля. Далі можна зняти піддон та додати матеріал, задати час роботи сушарки і температуру на щиті керування. В процесі сушіння, маючи різні правила нотифікації, оператор реагує та змінює температуру сушіння або відкриває шибер для того щоб не процес сушіння відповідав вимогам.

На Raspberry Pi розгорнута інфраструктура сервісів, що складають один стек докер контейнерів, в саме:

- Mosquitto Broker
- Node Red
- Influxdb
- Grafana

І після того, як модуль зчитування передає свіжі дані з датчика в MQTT-топик, система Node-RED одразу їх приймає, приводить до потрібного формату та розділяє на два потоки.

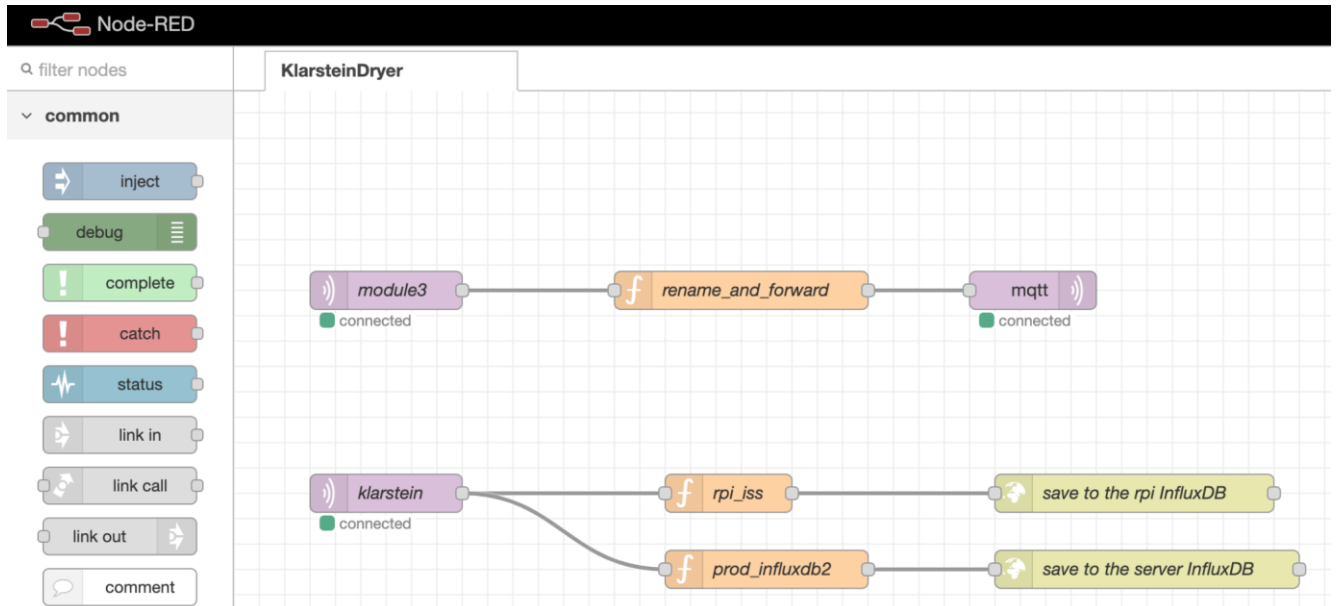


Рис. 4.4. Розроблений Node-RED потік даних

Один потік зберігається прямо на Raspberry Pi у локальній базі даних, а другий відправляється на сервер, де теж зберігається у базі. Додатково на сервері працює система резервного копіювання. У результаті — маємо два незалежних сховища та додаткові резервні копії, що робить систему максимально надійною.

Моніторинг сушіння здійснюється у системі Grafana. Її головне завдання — збирати інформацію з різних джерел і відображати її у вигляді зручних графіків, таблиць, карт та панелей. Для контролю процесу сушіння можна налаштувати правила сповіщень, наприклад, у яких температурних межах має відбуватися сушка. Якщо параметри виходять за межі, система може надіслати повідомлення на e-mail або в месенджер. У нашому випадку використовується Telegram.

Налаштовано два правила. Перше — коли зміна ваги стає дуже малою, тобто процес сушіння майже завершено, надсилається повідомлення у Telegram-канал. Друге — контроль температури сушіння. Якщо температура опускається нижче 40°C, ми отримуємо повідомлення, щоб вчасно відреагувати та повернути процес у потрібний діапазон.

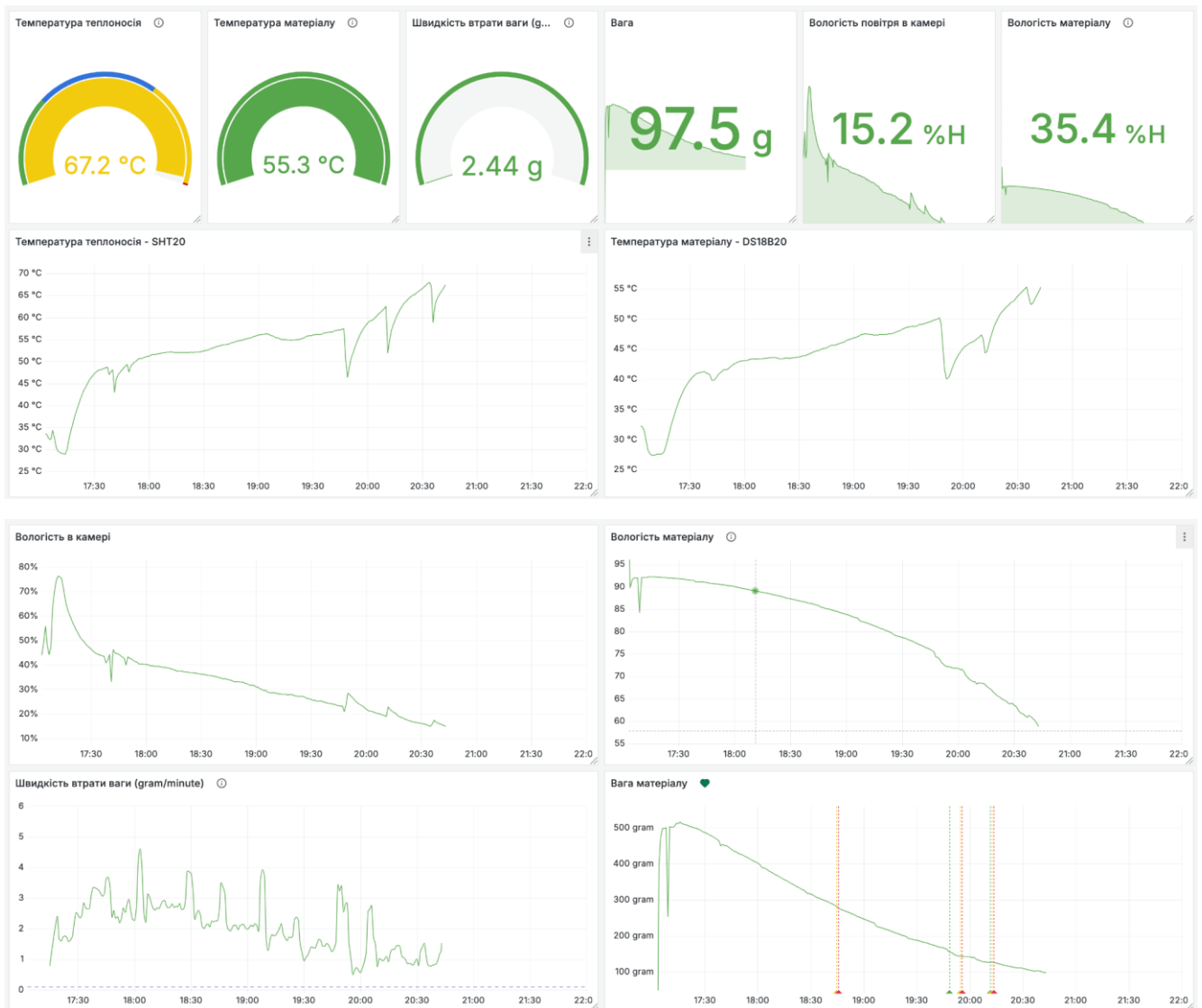


Рис. 4.5. Моніторинг процесу сушки у Grafana

На приведеному рисунку 4.5 можна побачити різні дані і графіки які безперервно відображають процес дегідратації. Зокрема було налаштований вивід поточних значень та динамічних даних в вигляді графіків для:

- 1) температури теплоносія;
- 2) температури матеріалу;
- 3) швидкості втрати ваги;
- 4) ваги матеріалу;
- 5) вологості повітря в камері;
- 6) вологості матеріалу (розрахункова).

Також додатково був налаштований графік прогнозу завершення сушіння (рис. 4.6), що для є дуже корисною інформацією на виробництві під час планування ресурсів та часу.

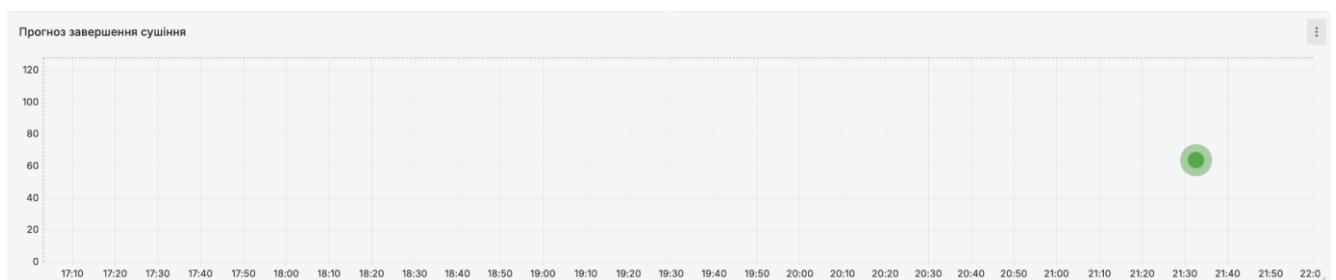


Рис. 4.6. Прогноз завершення сушіння

Як видно з рис. 4.7, в кінці процесу сушіння фактичні дані співпали з теорією. Так на наступному рисунку видно, що температура теплоносія та температура матеріалу зрівнялись, а вологість матеріалу почала дуже повільно зменшуватись.

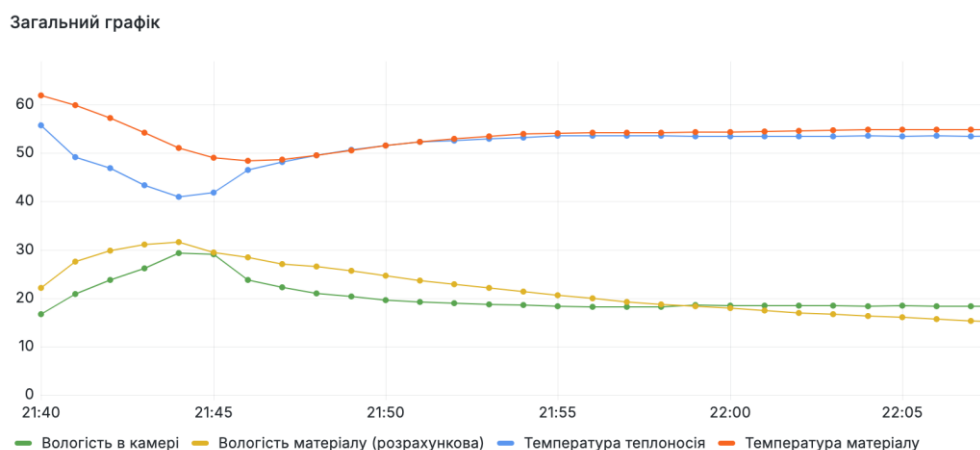


Рис. 4.7. Загальний графік (остання стадія сушіння)

На рис. 4.8. представлений графік ілюструє, що швидкість втрати вологи приблизився до контрольного значення 0.2 грами/хвилину. Саме це значення було встановлено в правилі нотифікації, що інформує про завершення процесу сушіння.

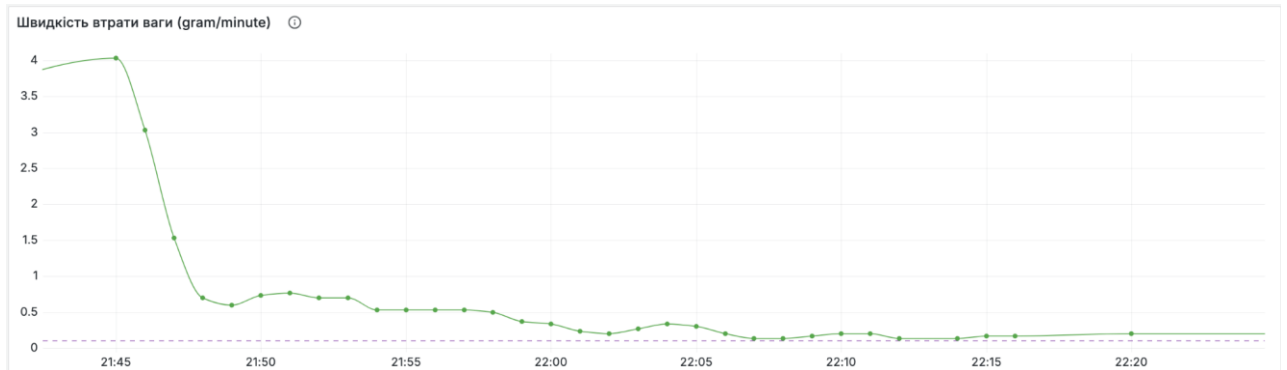


Рис. 4.8. Швидкість втрати ваги (остання стадія сушіння)

Відразу після досягнення критерію нотифікації Grafana надсилає повідомлення до телеграм каналу (рис. 4.9.) з текстом “Please turn off the drier”.

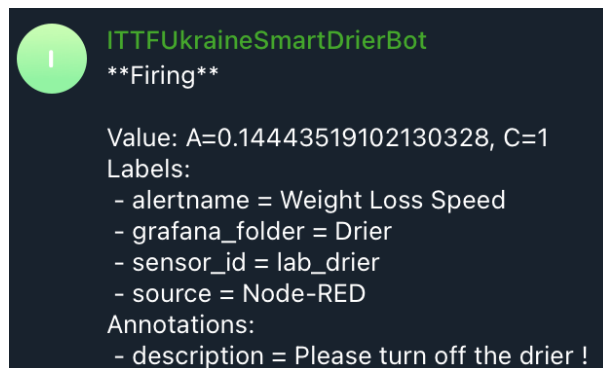


Рис. 4.9. Повідомлення в Telegram про необхідність вимкнути сушарку

За результатами дослідження сушіння вологість моркви становила 13 %, а час процесу сушіння склав 5 год 5 хв. На рис. 4.10 представлено сушену моркву отриману в результаті дослідження.



Рис. 4.10. Отриманий продукт після сушіння

#### 4.4. Недоліки сушарки KLARSTEIN та можливі покращення в майбутньому

Під час сушіння моркви були зроблені знімки інфрачервоною камерою InfiRay P2Pro (рис. 4.11.), яка була підключена до смартфона.

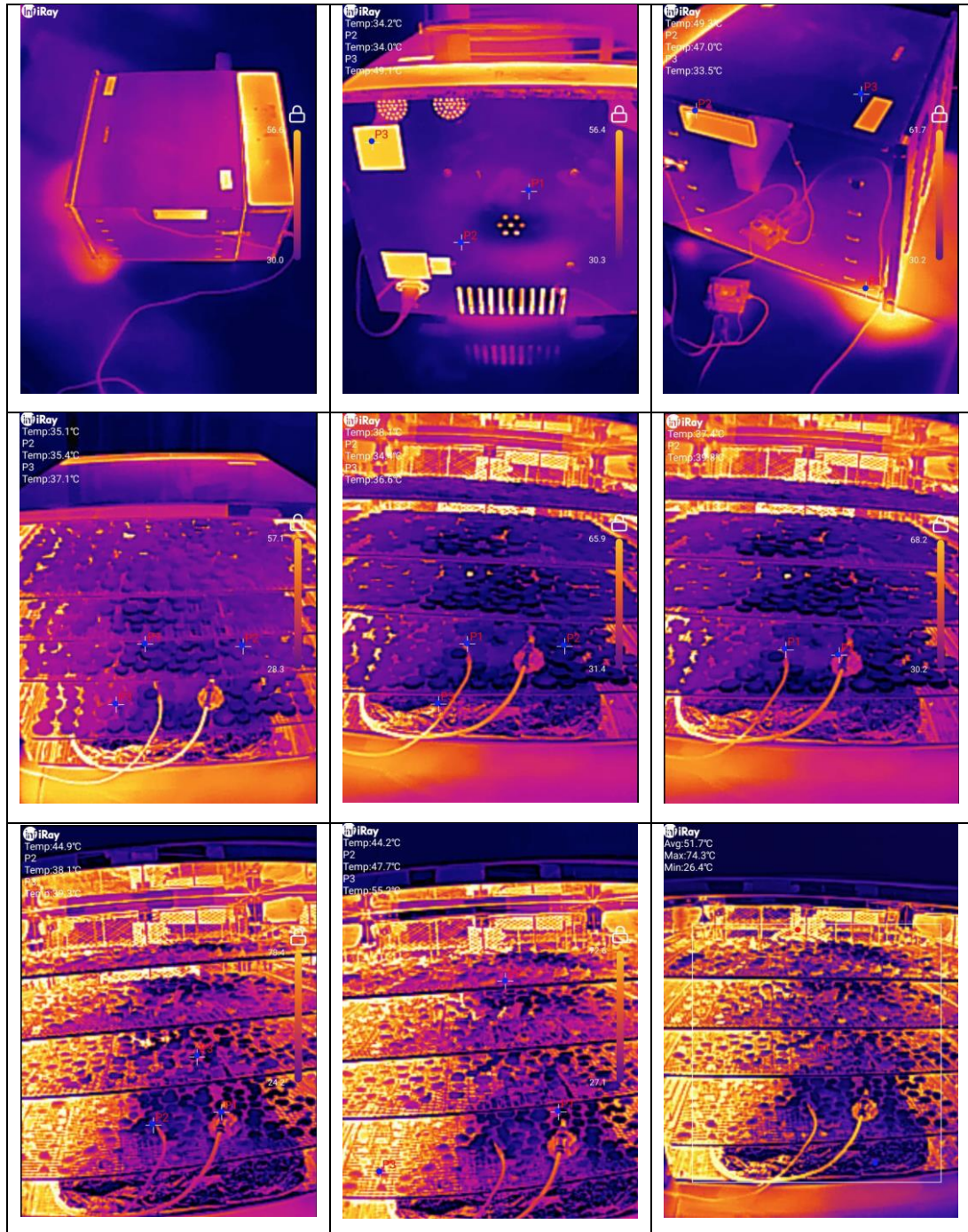


Рис. 4.11. Інфрачервоні знімки InfiRay P2Pro

Проаналізувавши знімки, були виявлені наступні недоліки сушарки:

- нерівномірність температури;

- значні перепади температури між верхніми, середніми та нижніми піддонами

- наявність "мертвих зон", особливо в кутах
- недостатня циркуляція;
- втрати тепла (витік тепла через дверцята, особливо на краях)
- перегрів корпусу (перевищує 60 °C)

Тобто ці прогалини в дизайні сушарки критичні для автоматизації процесу сушіння, оскільки висушування буде нерівномірним.

У подальших дослідженнях можливі наступні покращення сушарки:

- автокерування нагріву
- теплоізоляція корпусу
- вирішення проблеми слабкої циркуляції потоку теплоносія аварійне вимкнення під час критичного перегріву

#### **4.5. Висновки до четвертого розділу**

1. Оснащено існуючу сушарку KLARSTEIN додатковими датчиками температури, вологи, тензодатчиком, модулем збору та обробки даних, які дозволяють в подальшому автоматизувати контроль даної установки.

2. Розроблена система моніторингу та автоматичного контролю процесу сушіння, яка дозволяє відстежувати в реальному часі динаміку тепломасообміну з метою мінімізації енерговитрат та забезпечення стандартів та якості.

3. Система дозволить збирати та зберігати великі масиви даних для аналізу динаміки випаровування вологи; досліджувати вплив режимів сушіння на збереження корисних речовин, знаходити оптимальні режими сушіння.

4. Завдяки використанню сучасних технологій (MQTT, Docker, Node-RED, InfluxDB, Grafana), систему можна легко адаптувати та масштабувати.

5. Використовувати як приклад інтеграції IoT та хмарних технологій у навчанні за інженерними спеціальностями.

## РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ КАРОТИНОВМІСТНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 5.1. Технологія отримання композитних каротиномісних порошків

Антиоксидантні рослинні порошки мають максимальний вміст каротиноїдів. Для отримання цих порошків, як основу використовуємо моркву або гарбуз, які містять в собі найбільше каротиноїдів. Ці овочі, для стабілізації каротиноїдів поєднуємо з сировиною, яка покращує смак кінцевого продукту та стабілізує каротиноїди під час сушіння. Рослинні олії та білки допомагають під час травлення перетворити їх у провітамін А.

Як видно з попередніх досліджень, головними чинниками, які впливають на збереження вмісту каротиноїдів є температура та відносна активність компонентів. Були створені композитні суміші на основі овочів, фруктів та бобових.

Технологічна схема отримання композитних антиоксидантних порошків на основі моркви та гарбуза представлена на рис. 5.1. Розглянемо технологічну схему отримання антиоксидантних порошків на основі моркви та селери кореневої або гарбуза та хурми.

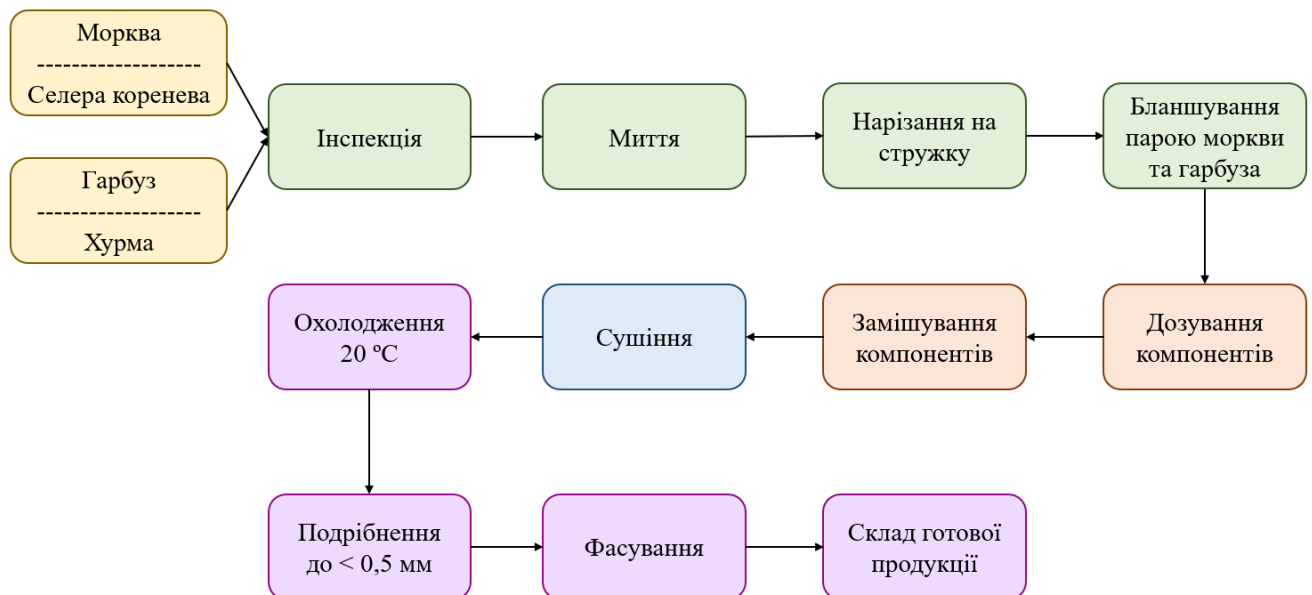


Рис. 5.1. Технологічна схема отримання композитних антиоксидантних каротиновмісних порошків на основі моркви та гарбуза

Моркву попередньо миють в чистій воді у співвідношенні 1:3 в мийній машині, якість миття при цьому систематично контролюється. Морква повинна бути повністю відмита від залишків ґрунту та інших забруднювачів, які є джерелом попадання в продукт спор мікроорганізмів.

Вимиту моркву інспектують, забирають сторонні домішки і направляють на очистку від шкіри, де можна використовувати механічну корундову чистку. Після очищення морква поступає на додаткове миття. Очищені коренеплоди направляють на різання на стружку.

Селеру кореневу обробляють так само, як і моркву, і з'єднують з підготовленою морквою в дозаторі. Суміш у співвідношенні 1:1 піддають гіротермічній обробці протягом 3 хв при температурі пари 98-100°C. Морквяно-селерну суміш сушать за ступінчастим режимом 100/70°C до кінцевої вологості 7-8%. Висушену морквяно-селерну суміш охолоджують на повітрі.

Висушену сировину направляють на стадію диспергування, де її подрібнюють до порошкоподібного стану і сортують у сепараторі до розміру частинок до 0,16-0,5 мм. Отриманий морквяно-селерний порошок упаковують у крафт-пакети та маркують.

Гарбуз миють в мийній машині. Після цього гарбуз інспектують та ріжуть декілька частин, видаляють насіння та серцевину. Гарбуз нарізають стружку. Нарізаний гарбуз бланшують у водяному середовищі протягом 5 хв за температури 100 °C.

Плоди хурми середньої стиглості миють, сортують та інспектують, після чого нарізають на стружку і без попередньої гіротермічної обробки направляють на дозування компонентів.

Після підготовки гарбуза та хурми їх дозують у співвідношенні 1:1 та замішують. Гарбузово-хурмяну суміш сушать за ступінчастим режимом 100/65°C до кінцевої вологості 7-8%. Висушену гарбузово-хурмяну суміш охолоджують на повітрі.

Гарбузово-хурмяну суміш, як морквяно-селерну суміш відправляють на стадію диспергування та пакування.

## 5.2. Технологія отримання білково-каротиномістних порошків

Технологічна схема отримання каротиномістних білковомістних порошків представлена на рис. 5.2. Розглянемо технологічну схему отримання каротиномістних білковомістних порошків на основі моркви та бобів або гарбуза та хурми.

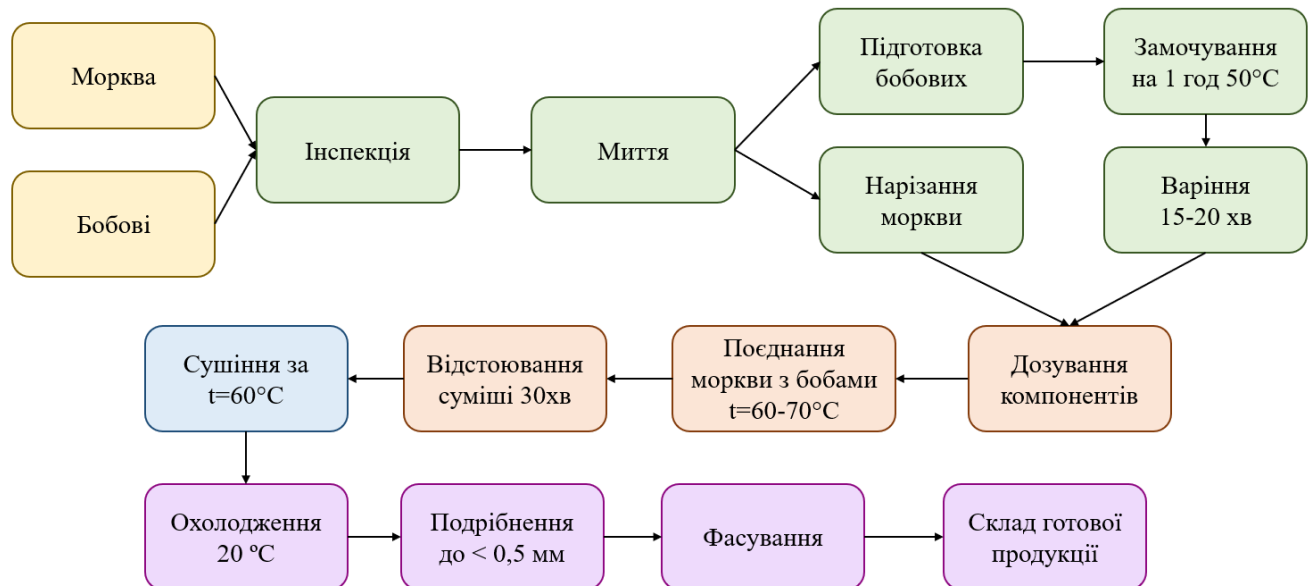


Рис. 5.2. Технологічна схема отримання каротиномістних білковомістних порошків

Підготовка моркви за цією технологією відбувається так само, як і в попередній.

Соєві боби або інші бобові інспектують, потім миють у машині для мийки сої з температурою води 18 – 20 °С. Після боби замочують у воді у співвідношенні 1:4 з температурою 50°С протягом 1 години. Після чого воду зливають та боби перекладають у ємність для варіння за температури води 97-100°С протягом 15-20 хвилин.

Далі зливають воду з бобів, в оптимальних співвідношеннях 1:2 до гарячих бобів 60-70°С додають підготовлену моркву, перемішують і суміш витримують разом 30 хв для інактивації ферментів моркви. Далі суміш подрібнюють разом.

Підготовлену суміш рівномірно розподіляють на піддонах сушильної установки, які завантажують у візки. Сушіння суміші проводиться за ступеневим

режимом 100/70°C до кінцевої вологості 8%. Висушена сировина поступає на охолодження до температури матеріалу 20°C.

Висушена сировина поступає на диспергування, де подрібнюється до порошкоподібного стану та сортують у сепараторі до розмірів частинок до 0,16 – 0,5 мм. Отриманий білково-каротиновмістний порошок фасують у крафт-мішки та маркують.

### **5.3. Висновки до четвертого розділу**

1. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання композитних антиоксидантних каротиновмістних порошків на основі моркви та гарбуза.

2. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання каротиновмістних білковомістних порошків.

## Висновки

У дисертаційній роботі представлені результати дослідження сушіння каротиновмістних матеріалів та розробки теплотехнології з їх переробки на сухі композитні матеріали. Виконано огляд технологій з сушіння каротиновмістних матеріалів, проведено підготовку та створення композитних сумішей, дослідження їх сушіння, що дало змогу отримати наступні результати:

1. Проведений аналіз науково-технічної, патентної літератури показав стан досліджень тепломасообмінних процесів при переробці каротиновмістної рослинної сировини.
2. За результатами проведених досліджень розроблена підготовка сировини до сушіння, за якої зменшуються втрати каротиноїдів до 5-8%.
3. Визначена кінетика процесу сушіння каротиновмісної рослинної сировини, яка дозволила розробити енергоефективні ступеневі режими сушіння, при яких максимальне збереження каротиноїдів у матеріалах.
4. Визначені регідратаційні властивості каротиновмістних матеріалів, які показали доцільність розроблених режимів сушіння.
5. Розраховано кінетику тепловологообміну при сушінні каротиновмістних матеріалів, яка показала співпадіння теоретичних та експериментальних даних із похибкою не більше 5%.
6. Визначено та узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння білково-каротиновмістної сировини.
7. Із узагальнених кривих сушіння та швидкості сушіння розраховані відносні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння білково-каротиновмістної сировини.
8. Розрахована густина теплового потоку, яка витрачається на випаровування води в залежності від інтенсивності випаровування і вологовмісту матеріалу.

9. Досліджено зміну критерію оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність запропонованих ступеневих режимів сушки.
10. Досліджено зміну коефіцієнту тепловіддачі при сушінні білково-каротиновмісної суміші.
11. Оснащено існуючу сушарку KLARSTEIN додатковими датчиками температури, вологи, тензодатчиком, модулем збору та обробки даних, які дозволяють в подальшому автоматизувати контроль даної установки.
12. Розроблена система моніторингу та автоматичного контролю процесу сушіння, яка дозволяє відстежувати в реальному часі динаміку тепломасообміну з метою мінімізації енерговитрат та забезпечення стандартів та якості.
13. Система дозволить збирати та зберігати великі масиви даних для аналізу динаміки випаровування вологи; досліджувати вплив режимів сушіння на збереження корисних речовин, знаходити оптимальні режими сушіння.
14. Завдяки використанню сучасних технологій (MQTT, Docker, Node-RED, InfluxDB, Grafana), систему можна легко адаптувати та масштабувати.
15. Використовувати як приклад інтеграції IoT та хмарних технологій у навчанні за інженерними спеціальностями.
16. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання композитних антиоксидантних каротиновмістних порошків на основі моркви та гарбуза.
17. Розроблено інноваційну теплотехнологію отримання каротиновмістних білковмістних порошків.

### Список використаної літератури

1. Doymaz, İ. (2005). Drying behaviour of green beans. *Journal of food Engineering*, 69(2), 161-165.
2. Inyang, U., Oboh, I., & Etuk, B. (2017). Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 8(1), 45-72.
3. Sun, T., Rao, S., Zhou, X., & Li, L. (2022). Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. *Molecular Horticulture*, 2(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>
4. Sun, Y., Hu, P., Jiang, Y., Wang, Z., Chang, J., Zhou, Y., & Shao, H. (2025). Comprehensive analysis of metabolomics and transcriptomics reveals varied tepal pigmentation across *Gloriosa* varieties. *BMC Plant Biology*, 25(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06067-y>
5. Arshad, Z., Ashraf, N., Ali, A., Iqbal, A., Rafique, M., Gulzar, M., ... & Hassan, S. A. (2025). Evaluation of the Antioxidant and Antimicrobial Properties of Pumpkin Pulp During Storage Through the Ultrasonication Process. *Food Science and Engineering*, 87-102.
6. Al-Anoos, I. M., EI-dengawy, R., & Hasanin, H. (2015). Studies on chemical composition of some Egyptian and Chinese pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed varieties. *Journal of Plant Science & Research*, 2(2), 1-4.
7. Islam, M., Jothi, J. S., Habib, M. R., & Iqbal, A. (2014). Evaluation of nutritional and sensory quality characteristics of pumpkin pies. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 1(07), 1091-1097.
8. Piepiórka-Stepuk, J., Wojtasik-Kalinowska, I., Sterczyńska, M., Mierzejewska, S., Stachnik, M., & Jakubowski, M. (2023). The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. *Lwt*, 175, 114469. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114469>
9. Mia, S., Bulbul, M. T. A., Hasan, T., Sheikh, M. H., & Haque, M. T. (2024). Maximizing Carrot Productivity: The Role Of Potassium And Boron In Crop Performance. *Tropical Agroecosystems (TAEC)*, 5(1), 47-50. <http://doi.org/10.26480/taec.02.2024.78.81>

10. Hyun, J. E., Kim, J. Y., Kim, E. M., Kim, J. C., & Lee, S. Y. (2019). Changes in microbiological and physicochemical quality of dried persimmons (*Diospyros kaki* Thunb.) stored at various temperatures. *Journal of Food Quality*, 2019(1), 6256409. <https://doi.org/10.1155/2019/6256409>.
11. Снежкін, Ю. Ф., & Шапар, Р. О. (2020). Енергоєфективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(2), 5-17. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.1>
12. Owolarafe OK, Muritala, O. A., & Ogunsina, B. S. (2007). Development of an okra slicing device. *J Food Sci Technol*, 44(4), 426-429.
13. Adebooye, O. C., & Oputa, C. O. (1996). Effects of galex (r) on growth and fruit nutrient composition of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *Ife Journal of Agriculture*, 18(1), 1-9.
14. Bamire, A. S., & Oke, J. T. O. (2004). Profitability of vegetable farming under rainy-and dry-season production in Southwestern Nigeria. *Journal of vegetable crop production*, 9(2), 11-18.
15. Снежкін, Ю. Ф., Пазюк, В. М., & Гусарова, О. В. (2024). Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 46 (4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.1>
16. Okos, M. R., Campanella, O., Narsimhan, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (2018). Food dehydration. In *Handbook of food engineering* (pp. 799-950). CRC Press.
17. Li, Y., He, D., Li, B., Lund, M. N., Xing, Y., Wang, Y., ... & Li, L. (2021). Engineering polyphenols with biological functions via polyphenol-protein interactions as additives for functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 470-482. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.009>
18. De Oliveira, T. T. B., dos Reis, I. M., de Souza, M. B., da Silva Bispo, E., Maciel, L. F., Druzian, J. I., ... & de Santana, L. R. R. (2021). Microencapsulation of *Spirulina* sp. LEB-18 and its incorporation in chocolate milk: Properties and functional potential. *Lwt*, 148, 111674. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111674>

19. Chaudhary, K., Khalid, S., Alomar, T. S., AlMasoud, N., Ansar, S., Ghazal, A. F., ... & Aadil, R. M. (2025). Ultrasound assisted natural deep eutectic solvents based sustainable extraction of *Spirulina platensis* and orange peel extracts for the development of strawberry-cantaloupe based novel clean-label functional drink. *Ultrasonics Sonochemistry*, 107357. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107357>
20. Mesías, F. J., Martín, A., & Hernández, A. (2021). Consumers' growing appetite for natural foods: Perceptions towards the use of natural preservatives in fresh fruit. *Food Research International*, 150, 110749. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110749>
21. Hassanzadeh, H., Ghanbarzadeh, B., Galali, Y., & Bagheri, H. (2022). The physicochemical properties of the spirulina-wheat germ-enriched high-protein functional beverage based on pear-cantaloupe juice. *Food Science & Nutrition*, 10(11), 3651-3661. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2963>
22. Luy, M., Di Giulio, P., Di Lego, V., Lazarevič, P., & Sauerberg, M. (2020). Life expectancy: frequently used, but hardly understood. *Gerontology*, 66(1), 95-104. <https://doi.org/10.1159/000500955>
23. Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H., ... & Qoronfleh, M. W. (2023). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820-834.
24. Rane, B. R., Amkar, A. J., Patil, V. S., Vidhate, P. K., & Patil, A. R. (2024). Opportunities and challenges in the development of functional foods and nutraceuticals. *Formulations, Regulations, and Challenges of Nutraceuticals*, 227-254.
25. Zannou, O., Oussou, K. F., Chabi, I. B., Alamous, F., Awad, N. M., Miassi, Y. E., ... & Ibrahim, S. A. (2025). Phytochemical and nutritional properties of sumac (*Rhus coriaria*): a potential ingredient for developing functional foods. *Journal of Future Foods*, 5(1), 21-35.
26. Rivero-Segura, N. A., Zepeda-Arzate, E. A., Castillo-Vazquez, S. K., Fleischmann-delaParra, P., Hernández-Pineda, J., Flores-Soto, E., ... & Gomez-

- Verjan, J. C. (2024). Exploring the Geroprotective Potential of Nutraceuticals. *Nutrients*, *16*(17), 2835.
- 27.Петрова, Ж. О., & СНЕЖКІН, Ю. Ф. (2018). Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини: монографія. Київ: Наукова думка.
- 28.Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, *4*(8), 118. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.70902>.
- 29.Halliwell, B. (1995, November). How to characterize an antioxidant: an update. In *Biochemical Society Symposia* (Vol. 61, pp. 73-101). Portland Press Limited. <https://doi.org/10.1042/bss0610073>
- 30.Shi, H., Noguchi, N., & Niki, E. (1999). Comparative study on dynamics of antioxidative action of  $\alpha$ -tocopheryl hydroquinone, ubiquinol, and  $\alpha$ -tocopherol against lipid peroxidation. *Free Radical Biology and Medicine*, *27*(3-4), 334-346. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(99\)00053-2](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(99)00053-2)
- 31.Levine, M., Rumsey, S. C., Daruwala, R., Park, J. B., & Wang, Y. (1999). Criteria and recommendations for vitamin C intake. *Jama*, *281*(15), 1415-1423. <https://doi.org/10.1001/jama.281.15.1415>.
- 32.Meléndez-Martínez, A. J., Stinco, C. M., & Mapelli-Brahm, P. (2019). Skin carotenoids in public health and nutricosmetics: The emerging roles and applications of the UV radiation-absorbing colourless carotenoids phytoene and phytofluene. *Nutrients*, *11*(5), 1093.
- 33.Петрова, Ж. О., Новікова, Ю. П., Слободянюк, К. С., Граков, О. П., & Коваль, І. О. (2024). Переробка хурми (*Diospyros kaki* L.) Сушінням. *Scientific Works*, *88*(1), 19-29. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2955>
- 34.Meléndez-Martínez, A. J., Mandić, A. I., Bantis, F., Böhm, V., Borge, G. I. A., Brnčić, M., ... O'Brien, N. (2021). A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: *status quo*, applications, patents, and research needs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(8), 1999–2049. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1867959>

35. Mapelli-Brahm, P., Gómez-Villegas, P., Gonda, M. L., León-Vaz, A., León, R., Mildenerger, J., Rebours, C., Saravia, V., Vero, S., Vila, E., & Meléndez-Martínez, A. J. (2023). Microalgae, Seaweeds and Aquatic Bacteria, Archaea, and Yeasts: Sources of Carotenoids with Potential Antioxidant and Anti-Inflammatory Health-Promoting Actions in the Sustainability Era. *Marine Drugs*, 21(6), 340. <https://doi.org/10.3390/md21060340>
36. Sandmann, G. (2022). Carotenoids and Their Biosynthesis in Fungi. *Molecules*, 27(4), 1431. <https://doi.org/10.3390/molecules27041431>
37. Contributors to Wikimedia projects. (2003, 12 August). *Carotenoid* - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Carotenoid>
38. Загайко, А.Л. (2010, 13 вересня). *КАРОТИНОЇДИ*. Фармацевтична енциклопедія. <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/3457/karotinoidi>
39. Tanrıver, K., Bilgin, M., Şahin Sevgili, S., Toprakçı Yüksel, İ., & Kurtulbaş Şahin, E. (2025). Extraction of Carotenoids from Pumpkin (*Cucurbita moschata*) and Spinach (*Spinacia oleracea*) Using Environmentally Friendly Deep Eutectic Solvents (DESs). *AppliedChem*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.3390/appliedchem5010002>
40. *Carotenoids* | Linus Pauling Institute. (б. д.). Linus Pauling Institute. <https://lpi.oregonstate.edu/mic/dietary-factors/phytochemicals/carotenoids#introduction>
41. Sandmann G. (2022). Carotenoids and Their Biosynthesis in Fungi. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(4), 1431. <https://doi.org/10.3390/molecules27041431>
42. Di Carlo, E., & Augustin, A. J. (2021). Prevention of the Onset of Age-Related Macular Degeneration. *Journal of Clinical Medicine*, 10(15), 3297. <https://doi.org/10.3390/jcm10153297>
43. Учасники проєктів Вікімедіа. (2020, 28 червня). *Бета-каротин* — Вікіпедія. Вікіпедія. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Бета-каротин>
44. Снежкін, Ю.Ф., & Петрова, Ж.О. (2007). Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмістних порошків. *Київ: ВД «Академперіодика»*.

45. Банк даних | Державна служба статистики України. (б. д.). Головна сторінка Держстат | Державна служба статистики України. [https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU:DF\\_AREA\\_HARVESTS\\_CROP\\_YIELD\(17.0.0\)&filter=YIELD\\_AGRICULTURAL\\_CROP.\\*.\\*.\\*.\\*.\\*.\\*.\\*](https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU:DF_AREA_HARVESTS_CROP_YIELD(17.0.0)&filter=YIELD_AGRICULTURAL_CROP.*.*.*.*.*.*.*)
46. Tridge - Find The World's Most Competitive Suppliers. (б. д.). Tridge - Find The World's Most Competitive Suppliers. <https://www.tridge.com/intelligences/carrot/production>
47. Tridge - Find The World's Most Competitive Suppliers. (б. д.-b). Tridge - Find The World's Most Competitive Suppliers. <https://www.tridge.com/intelligences/common-pumpkin/production>
48. Cieurzyńska, A., Janowicz, M., Karwacka, M., Galus, S., Kowalska, J., & Gańko, K. (2022). The Effect of Hybrid Drying Methods on the Quality of Dried Carrot. *Applied Sciences*, 12 (20), 10588.
49. Imani, J., Lorenz, H., Kogel, K. H., & Glebe, D. (2007). Transgenic Carrots: Potential Source of Edible Vaccines. *J. Verbr. Lebensm*, 2(1), 105.
50. Kumar, A., & Rao, P. S. Drying Characteristics, Quality Analyses, and Optimizing the Drying Time and Energy Consumption of Hybrid Drying of Orange Carrots. Quality Analyses, and Optimizing the Drying Time and Energy Consumption of Hybrid Drying of Orange Carrots. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5000385>
51. Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>
52. Phoosomma, P., & Korbuakaew, K. (2024). Innovative Hybrid Food Processing Drying Chambers. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(12), 302-307. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V11I12P128>
53. Jongyingcharoen, J. S., Naweera, W., Sangruangnak, S., & Assawadejmethakul, A. (2025). Determination of Effective Moisture Diffusivity Considering Shrinkage

- for Vibration-Assisted Infrared Drying of Pumpkin. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 150, p. 03001). EDP Sciences..  
<https://doi.org/10.1051/bioconf/202515003001>
54. Mierzwa, D., & Musielak, G. (2024). Microwave and Ultrasound Assisted Rotary Drying of Carrot: Analysis of Process Kinetics and Energy Intensity. *Applied Sciences*, 14(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app142210676>
55. Kumar, H. P., Radhakrishna, K., Nagaraju, P. K., & Rao, D. V. (2001). Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 25(6), 447-460..  
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00472.x>
56. Meng, Z., Ding, C., Liu, Y., Zhang, Z., Zhang, W., Xu, P., ... & Huo, Z. (2024). Analysis of the interaction between airflow and high-voltage electric fields on drying characteristics of carrots using heat pump-electrohydrodynamics combined drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, 105241.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105241>
57. Гузьова І. О. & Атаманюк В. М. (2021). Енергетичний аналіз технологічної лінії виробництва цукатів з моркви. *Chemistry, Technology and Application of Substances = Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 4(1), 145–151.  
<https://doi.org/10.23939/ctas2021.01.145>.
58. Гузьова, І., & Атаманюк, В. (2020). Дослідження кінетики сушіння цукатів з гарбуза. *Scientific Works*, 84(1), 34-41.  
<https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1866>
59. Kocabiyyik, H., & Tezer, D. (2009). Drying of carrot slices using infrared radiation. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(5), 953-959.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01767.x>
60. Benseddik, A., Benahmed-Djilali, A., Azzi, A., Zidoune, M. N., Bensaha, H., Lalmi, D., & Allaf, K. (2020). Effect of drying processes on the final quality of potimarron pumpkin (*Cucurbita maxima*) powders. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 43(1), 136–146. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1823233>
61. Oetjen, G. W., & Haseley, P. (2004). *Freeze-drying*. John Wiley & Sons. p. 421.

62. Mellor, J. D. (1978). *Fundamentals of freeze-drying* Academic Press Inc.; London, UK: 1978. p. 386.
63. Adams, G.D.J., Cook, I., Ward, K.R. (2015). The Principles of Freeze-Drying. In: Wolkers, W., Oldenhof, H. (eds) *Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols. Methods in Molecular Biology*, vol 1257. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2193-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2193-5_4)
64. Franks, F., & Auffret, T. (2008). *Freeze-drying of Pharmaceuticals and Biopharmaceuticals*. royal Society of Chemistry.
65. Liu, Y., Zhao, Y., & Feng, X. (2008). Exergy analysis for a freeze-drying process. *Applied Thermal Engineering*, 28(7), 675-690. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.06.004>
66. Nowak, D., & Jakubczyk, E. (2020). The Freeze-Drying of Foods-The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(10), 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
67. *FD-50R 500Kgs Food Freeze Dryer Industrial Fruit Freeze Drying Plant - Vikumer Freeze Dry*. (б. д.). Vikumer Freeze Dry. <https://vikumer.com/fd-50r-500kgs-food-freeze-dryer-industrial-fruit-freeze-drying-plant/>
68. Geng, Z., Li, M., Zhu, L., Zhang, X., Zhu, H., Yang, X., ... & Hu, B. (2023). Design and Experiment of Combined Infrared and Hot-Air Dryer Based on Temperature and Humidity Control with Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). *Foods*, 12(12), 2299. <https://doi.org/10.3390/foods12122299>
69. Петрова, Ж. О., Пазюк, В. М., Вішнєвський, В. М., & Граков, Д. П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр*, 2021, 1 (33), 109-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036102>
70. Pozar, D. M. (2021). *Microwave engineering: theory and techniques*. John Wiley & sons.

71. Sorrentino, R., & Bianchi, G. (2010). *Microwave and RF engineering*. John Wiley & Sons.
72. Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2010). Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—A review. *Food and bioprocess technology*, 3(2), 161-171.
73. Wray, D., & Ramaswamy, H. S. (2015). Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, 33(7), 769-783.
74. Wang, J., Xiong, Y. S., & Yu, Y. (2004). Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *European Food Research and Technology*, 219(5), 500-506.
75. Deepika, S., & Sutar, P. P. (2018). Combining osmotic–steam blanching with infrared–microwave–hot air drying: Production of dried lemon (*Citrus limon* L.) slices and enzyme inactivation. *Drying Technology*, 36(14), 1719-1737.
76. Снежкін, Ю., Петрова, Ж., Пазюк, В., Тельніков, Є., Вишнівський, В., & Малащук, Н. (2023). Енергоефективна камерна сушарка з товстоплівковими нагрівальними елементами. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 75(2), 85-95. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.07>
77. Снежкін, Ю. Ф., Чалаєв, Д. М., Шаврін, В. С., & Дабіжа, Н. О. (2008). Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. *Під. ред. акад. НАН України АА Долинського. НАН України, Інститут технічної теплофізики*.
78. EL-Mesery, H. S., Sarpong, F., Xu, W., & Elabd, M. A. (2022). Design of low-energy consumption hybrid dryer: A case study of garlic (*Allium sativum*) drying process. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101929. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101929>
79. Nguyen, H. H. V., & Nguyen, L. T. (2015). Handbook of Vegetables Preservation Processing. In *Handbook of Vegetable Preservation and Processing* (pp. 449-478). CRC Press.
80. Mandrich, L., Esposito, A. V., Costa, S., & Caputo, E. (2023). Chemical Composition, Functional and Anticancer Properties of Carrot. *Molecules*, 28(20), 7161. <https://doi.org/10.3390/molecules28207161>

81. Fartoosi, Z., Kolahi, M., Heidarizadeh, F., & Goldson-Barnaby, A. (2025). The impact of thermal and non-thermal processing on the phytochemical characteristics and nutritional value of *Daucus carota* (carrots). *Applied Food Research*, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100732>
82. Tian, Z., Dong, T., Wang, S., Sun, J., Chen, H., Zhang, N., & Wang, S. (2024). A comprehensive review on botany, chemical composition and the impacts of heat processing and dehydration on the aroma formation of fresh carrot. *Food Chemistry: X*, 22, 101201. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101201>
83. Hager, T. J., & Howard, L. R. (2006). Processing effects on carrot phytonutrients. *HortScience*, pp. 74-79, <https://doi.org/10.21273/hortsci.41.1.74>
84. Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Tariq, R. M. S., Azam, M., & Akhtar, S. (2019). Phytochemicals in *Daucus carota* and Their Health Benefits—Review Article. *Foods*, 8(9), 424. <https://doi.org/10.3390/foods8090424>
85. Yang, W., Chen, X., Li, Y., Guo, S., Wang, Z., & Yu, X. (2020). Advances in pharmacological activities of terpenoids. *Natural Product Communications*, 15(3), 1934578X20903555. <https://doi.org/10.1177/1934578X20903555>
86. Søltoft, M., Bysted, A., Madsen, K. H., Mark, A. B., Bügel, S. G., Nielsen, J., & Knuthsen, P. (2011). Effects of organic and conventional growth systems on the content of carotenoids in carrot roots, and on intake and plasma status of carotenoids in humans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(4), 767-775. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4248>
87. Oyeleke, A. W., Oluwajuyitan, D. T., Oluwamukomi, O. M., & Enujiugha, N. V. (2019). Amino acid profile, functional properties and in-vitro antioxidant capacity of *Cucurbita maxima* and *Cucurbita mixta* fruit pulps and seeds. *European Journal of Nutrition and Food Safety*, 10(4), 224-241. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2019/v10i430117>.
88. Altaf, A., Sharma, H., Dar, A. H., Dash, K. K., Pandey, V. K., & Manzoor, M. (2025). Phytochemical Potential and Biological Activity of Pumpkin: A Review. *Food Safety and Health*. <https://doi.org/10.1002/fsh3.70001>

89. Batool, M., Ranjha, M. M. A. N., Roobab, U., Manzoor, M. F., Farooq, U., Nadeem, H. R., Nadeem, M., Kanwal, R., AbdElgawad, H., Al Jaouni, S. K., Selim, S., & Ibrahim, S. A. (2022). Nutritional Value, Phytochemical Potential, and Therapeutic Benefits of Pumpkin (*Cucurbita* sp.). *Plants (Basel, Switzerland)*, 11(11), 1394. <https://doi.org/10.3390/plants11111394>
90. Fernández-López, J., Botella-Martínez, C., Navarro-Rodríguez de Vera, C., Sayas-Barberá, M. E., Viuda-Martos, M., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2020). Vegetable Soups and Creams: Raw Materials, Processing, Health Benefits, and Innovation Trends. *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(12), 1769. <https://doi.org/10.3390/plants9121769>
91. Roongruangsri, W., & Bronlund, J. E. (2015). A review of drying processes in the production of pumpkin powder. *International Journal of Food Engineering*, 11(6), 789-799. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0168>.
92. USDA. (б. д.). Pumpkin, Raw. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168448/nutrients>
93. Корінчевська, Т. В., & Михайлик, В. А. (2025, February). ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР. In *The 4 th International scientific and practical conference "Future of science: innovations and perspectives" (February 23-25, 2025) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2025. 399 p. (p. 114- 117).*
94. Canyan, K., Arias, Z. R., Omori, K., Yamamoto, T., Shinoda-Ito, Y., & Takashiba, S. (2025). The effects of soybeans and its derivatives on oral diseases: a narrative review. *International Journal of Food Science and Technology*, vvae044. <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvae044>
95. do Prado, F. G., Pagnoncelli, M. G. B., de Melo Pereira, G. V., Karp, S. G., & Soccol, C. R. (2022). Fermented Soy Products and Their Potential Health Benefits: A Review. *Microorganisms*, 10(8), 1606. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081606>
96. Rizzo, G. (2020). The Antioxidant Role of Soy and Soy Foods in Human Health. *Antioxidants*, 9(7), 635. <https://doi.org/10.3390/antiox9070635>

97. Kim, I. S., Kim, C. H., & Yang, W. S. (2021). Physiologically Active Molecules and Functional Properties of Soybeans in Human Health-A Current Perspective. *International journal of molecular sciences*, 22(8), 4054. <https://doi.org/10.3390/ijms22084054>
98. Kim, I.-S., Yang, W.-S., & Kim, C.-H. (2021). Beneficial Effects of Soybean-Derived Bioactive Peptides. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8570. <https://doi.org/10.3390/ijms22168570>
99. Kudelka, W., Kowalska, M., & Popis, M. (2021). Quality of Soybean Products in Terms of Essential Amino Acids Composition. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(16), 5071. <https://doi.org/10.3390/molecules26165071>
100. Wanna, R., Bunphan, D., Kunlanit, B., Khaengkhan, P., Khaengkhan, P., & Bozdoğan, H. (2025). Chemical Composition of Essential Oil from *Apium graveolens* L. and Its Biological Activities Against *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Dryophthoridae). *Plants*, 14(3), 347. <https://doi.org/10.3390/plants14030347>
101. Yan, J., Chen, J., Huang, Z., He, L., Wu, L., Yu, L., & Zhu, W. (2024). Characterisation of the volatile compounds in nine varieties and three breeding selections of celery using GC–IMS and GC–MS. *Food Chemistry: X*, 24, 101936. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101936>
102. QUIROS, C. F. (1993). Celery: *Apium graveolens* L. In *Genetic improvement of vegetable crops* (pp. 523-534). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040826-2.50041-2>
103. Учасники проєктів Вікімедіа. (2005, 23 квітня). *Селера пахуча* — Вікіпедія. Вікіпедія. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Селера\\_пахуча](https://uk.wikipedia.org/wiki/Селера_пахуча)
104. Нєміріч, О. В., Устименко, І. М., Гавриш, А. В., & Дорошкевич, Р. Ю. (2021). Теоретичні аспекти використання кореня селери у складі соусу. *Грааль науки*. – № 9. – С. 179–182. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.10.2021.28>
105. Singh, A., Saini, R. K., Kumar, A., Chawla, P., & Kaushik, R. (2025). Mushrooms as Nutritional Powerhouses: A Review of Their Bioactive

- Compounds, Health Benefits, and Value-Added Products. *Foods*, 14(5), 741. <https://doi.org/10.3390/foods14050741>
106. Wang, Z., Tao, K., Yuan, J., & Liu, X. (2024). Design and experiment on mechanized batch harvesting of Shiitake mushrooms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 217, 108593. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108593>
107. Jung, E. B., Choi, H. J., Lee, J. Y., Hwang, H. J., & Chung, M. S. (2025). Comparison between intense pulsed light and continuous ultraviolet treatment processes for enhancing the vitamin D2 content of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) powder. *Food Chemistry*, 468, 142434.
108. Sun, P., Nishiyama, S., Asakuma, H., Voorrips, R. E., Fu, J., & Tao, R. (2021). Genomics-based discrimination of 2n gamete formation mechanisms in polyploids: a case study in nonaploid *Diospyros kaki* 'Akiou'. *G3*, 11(8), jkab188.
109. Nathania, F., & Nurkhoeriyati, T. (2025). Drying technologies utilized to preserve persimmon fruits (*Diospyros kaki* L.): A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1445, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1445/1/012004>
110. Choudhary, R., Singh, A., Upadhyay, A., Singh, R., Thangalakshmi, S., Dar, A. H., ... & Shukla, S. (2023). Exotic god fruit, persimmon (*Diospyros kaki*): Pharmacological importance and human health aspects. *eFood*, 4(1), e52. <https://doi.org/10.1002/efd2.52>
111. Giordani, E., Doumett, S., Nin, S., & Del Bubba, M. (2011). Selected primary and secondary metabolites in fresh persimmon (*Diospyros kaki* Thunb.): A review of analytical methods and current knowledge of fruit composition and health benefits. *Food research international*, 44(7), 1752-1767. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.036>
112. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

113. Петрова, Ж. О., Пазюк, В. М., Вишнівський, В. М., Граков, Д. П., & Граков, О. П. (2021). Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(3), 24-29. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.3>
114. Держспоживстандарт. (1996). Перетворювані термоелектричні. Загальні технічні умови (ДСТУ 2857-94).
115. Ткаченко, С. Й., & Співак, О. Ю. (2008). Сушильні процеси та установки. *Вінниця: ВНТУ*.
116. Самойленко, К.М. (2019). Інтенсифікація тепломасообміну при купажуванні та сушінні антиоксидантної сировини [Дис. канд. тех. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України]. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/06/dis.pdf>.
117. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Пазюк, В. М. (2012). Гідротермічна обробка функціональної сировини. *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*, (41 (1)), 13-17.
118. Sniezhkin, Y., Petrova, Z., Bessarab, O., Samoilenko, K., Grakov, D., & Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-10>
119. Hogekamp, S., & Schubert, H. (2003). Rehydration of food powders. *Food Science and Technology International*, 9(3), 223-235. <https://doi.org/10.1177/1082013203034938>
120. Снежкін, Ю. Ф., Пазюк, В. М., Петрова, Ж. О., & Чалаєв, Д. М. (2012). Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. *Київ: Поліграф-Сервіс*.
121. Погожих, М. І., Потапов, В. О., Пак, А. О., & Жеребкін, М. В. (2016). Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини. Навчальний посібник. *Харків: ХДУХТ*.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

#### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишнівський, В.М., & Граков, Д.П. (2021). Напрями підвищення ефективності процесу сушіння в тунельних та комбінованих сушарках. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр.*, 1(33), 109-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036102> [Google Scholar, Index Copernicus, Academic Research Index (ResearchBib) та інші] (Внесок здобувача: проведення літературного огляду).
2. Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Вишнівський В.М., Граков Д.П., Граков О.П. Сушіння капусти білокачанної на конвективному сушильному стенді. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2021. 43 (3). С. 24 – 29 <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.3> Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
3. Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Bessarab O., Samoilenko K., Grakov D., Petrov P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 2023. Volume 12. Issue 3, p. 444-457, DOI: 10.24263/2304-974X-2023-12-3-10 [Фахове видання, SCOPUS, Q3] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
4. Петрова, Ж.О., & Граков, Д.П. (2025). Тепломасообмінні процеси під час одержання комбінованих каротиновмісних продуктів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 47(1), 30-40. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.3> [Фахове видання, Index Copernicus] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
5. Петрова, Ж.О., & Граков, Д.П. (2025). Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні білково-каротиновмісних матеріалів. *Теплофізика та*

*Теплоенергетика*, 47(2), 28-37. [https://doi.org/ 10.31472/ttpe.2.2025.3](https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.3) [Фахове видання, *Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

6. Слободянюк, К.С., Граков, О.П., & Граков, Д.П. (2021). Енергоефективне сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (с. 106 – 107). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

7. Петрова, Ж. О., Самойленко, К. М., Новікова, Ю. П., & Граков, Д. П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології»* (с. 76 – 78). Київ: Національний авіаційний університет. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

8. Petrova, Zh. O., Samoilenko, K.M., & Grakov, D. P. (2023). Functional products are the basis of healthy nutrition. *Матеріали X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини»* (с. 76 – 78). Прага : Oktan Print s.r.o.. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

9. Petrova, Zh., Novikova, Yu., & Grakov, D. (2025). Study of drying of composite raw materials based on pumpkin and persimmon. *Proceedings of the VIII International Scientific and Theoretical Conference «Current issues of science, prospects and challenges»* (с. 60 – 62). Sydney, Australia: International Center of Scientific Research. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

*Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:*

10. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Вишневецький, В.М., Граков, Д.П., & Граков, О.П. (2022). Підвищення ефективності сушіння рослинної сировини в тунельних та комбінованих сушарках. *Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»* (С. 203 - 220). Київ : ІВЦ АЛКОН НАН. (Внесок здобувача: проведення літературного огляду).

11. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Новікова, Ю.П., & Граков, Д.П. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з хурми та гарбуза (Заявка № а202406228). Національний Орган Інтелектуальної Власності Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності». (Внесок здобувача: розробка та створення способу одержання харчового порошку з хурми та гарбуза, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

12. Friesen, M., Loske, F.DR., Grakov, D., Cording, C., & Riechmann, T. (2024). Appliance connection plug-in connector with light indicator. (Patent WO2024061650A1). Weltorganisation für geistiges Eigentum. Internationales Büro (Внесок здобувача: розробка та створення роз'єму, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

13. Friesen, M., Grakov, D. (2024). Method for configuration of access control to power supply. (Patent WO2024067911A1). Weltorganisation für geistiges Eigentum. Internationales Büro (Внесок здобувача: розробка та створення методу, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).

**Відомості про апробацію результатів дисертації.**

Основні положення роботи викладено та обговорено на конференціях різного рівня:

1. XIX Всеукраїнська науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали» (Київ, 2021).
2. VI Міжнародна науково-практична конференція «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2022).
3. X міжнародна науково-практичній інтернет-конференції «Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини» (Прага, 2023).
4. VIII International Scientific and Theoretical Conference «Current issues of science, prospects and challenges» (Sydney, Australia, 2025).

## Патенти



МІНЕКОНОМІКИ  
 НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
 «УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»  
 (УКРНОІВІ)

вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95  
 e-mail: office@nipo.gov.ua, http://www.nipo.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 44673629

## Розписка про одержання заявки на винахід

Дата одержання 26.12.2024 15:55:20

Номер заявки **а 2024 06228** (в подальшому обов'язково посилається на цей номер)

Заявник ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

Назва винаходу СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ХАРЧОВОГО ПОРОШКУ З ХУРМИ ТА ГАРБУЗА

Адреса для листування Інститут технічної теплофізики НАН України, патентний сектор, вул. Марії Капніст, 2-а, м. Київ, 03057

## Подані матеріали

24/ЗА/Вх№13245 Заява про видачу патенту на винахід (КМ)

24/ЗА/Вх№13249 Формула винаходу (КМ) (арк. - 1, прим. - 3).

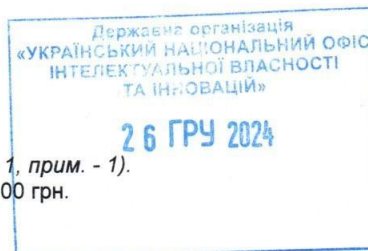
24/ЗА/Вх№13248 Опис винаходу (КМ) (арк. - 5, прим. - 3).

24/ЗА/Вх№13250 Реферат (арк. - 1, прим. - 3).

24/ЗА/Вх№13246 Документ, що підтверджує неприбутковість особи (арк. - 1, прим. - 1).

24/ЗА/Вх№13251 Платіжне доручення № 1120, дата 03.12.2024, сума 192,00 грн.

24/ЗА/Вх№13247 Лист



Прийняв(ла) \_\_\_\_\_ Петренко А.О.

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
28. März 2024 (28.03.2024)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2024/061650 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
*H01R 13/717* (2006.01) *H01R 13/74* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2023/074683

(22) Internationales Anmeldedatum:  
07. September 2023 (07.09.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2022 124 494.6  
23. September 2022 (23.09.2022) DE

(71) Anmelder: HARTING AG [CH/CH]; Leugenstrasse 10,  
2504 BIEL (CH).

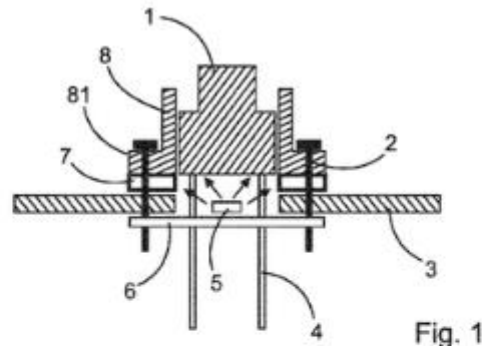
(72) Erfinder: FRIESEN, Markus; c/o HARTING Stiftung &  
Co. KG Marienwerderstrasse 3, 32339 Espelkamp (DE).  
DR. LOSKE, Felix; c/o HARTING Stiftung & Co. KG Ma-  
rienwerderstrasse 3, 32339 Espelkamp (DE). **GRAKOV, Dmytro**; c/o HARTING Stiftung & Co. KG Marienwerderstrasse 3, 32339 Espelkamp (DE). **CORDING, Christian**; c/o HARTING Stiftung & Co. KG Marienwerderstrasse 3, 32339 Espelkamp (DE). **RIECHMANN, Till**; c/o HARTING Stiftung & Co. KG Marienwerderstrasse 3, 32339 Espelkamp (DE).

(74) Anwalt: NOVENTIVE PATENTANWALTSGESellschaft MBH; Riesstrasse 16, 80992 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,

(54) Title: APPLIANCE CONNECTION PLUG-IN CONNECTOR WITH LIGHT INDICATOR

(54) Bezeichnung: GERÄTEANSCHLUSSSTECKVERBINDER MIT LEUCHTANZEIGE



(57) Abstract: In order to add a light indicator to an existing appliance connection plug-in connector, according to the invention said connector is equipped with the following: - with an at least partially transparent, circumferential frame part (7) for arranging around a wall opening of a housing wall (3) of an appliance housing. The frame part (7) is fixed between a mounting flange (81) of a mounting housing of the appliance connection plug-in connector and the housing wall (3). - Having at least one LED (5) for emitting light signals through the transparent frame part (7). - Having at least one carrier component (6) for securing the at least one LED (5), wherein the carrier component (6) has a passage or at least one through opening for the passage of the at least one appliance cable (4) of the appliance.

(57) Zusammenfassung: Um einen bereits existierenden Geräteanschlusssteckverbinders um eine Leuchtanzeige zu erweitern, wird vorgeschlagen, ihn mit Folgendem auszustatten: - Mit einem zumindest teilweise transparenten, umlaufenden Rahmenteil (7) zur Anordnung um einen Wanddurchbruch einer Gehäusewand (3) eines Gerätegehäuses. Fixiert wird das Rahmenteil (7) zwischen einem Anbauflansch (81) eines Anbaugehäuses des Geräteanschlusssteckverbinders und der Gehäusewand (3). - Mit zumindest einer LED (5) zum Aussenden von Lichtsignalen durch das transparente Rahmenteil (7). - Mit zumindest einem Trägerbauteil (6) zur Befestigung der zumindest einen LED (5), wobei das Trägerbauteil (6) einen Durchlass oder mindestens eine Durchgangsöffnung zur Durchführung der mindestens einen Geräteleitung (4) des Gerätes aufweist.

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
04. April 2024 (04.04.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2024/067911 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
H01R 13/66 (2006.01) H01R 13/70 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2023/100675
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
12. September 2023 (12.09.2023)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2022 125 259.0  
30. September 2022 (30.09.2022) DE
- (71) Anmelder: HARTING ELECTRIC STIFTUNG & CO. KG [DE/DE]; Wilhelm-Harting-Str. 1, 32339 Espelkamp (DE).
- (72) Erfinder: FRIESEN, Markus; c/o HARTING Electric Stiftung & Co. KG, Wilhelm-Harting-Str. 1, 32339 Espelkamp (DE). GRAKOV, Dmytro; c/o HARTING Electric Stiftung & Co. KG, Wilhelm-Harting-Str. 1, 32339 Espelkamp (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

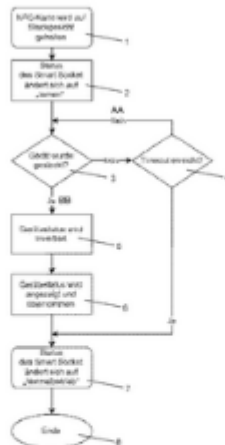
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: METHOD FOR CONFIGURATION OF ACCESS CONTROL TO POWER SUPPLY

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR KONFIGURATION EINER ZUGANGSKONTROLLE ZU EINER STROMVERSORGUNG



(57) Abstract: In order to grant permission to at least one electrical device to be supplied with power and/or withdraw this authorization from it, according to the invention, a teach-in method is used.

(57) Zusammenfassung: Zum Erteilen und/oder zum Entziehen einer Berechtigung zur Stromversorgung zumindest eines elektrischen Gerätes an einer Stromversorgungseinrichtung wird vorgeschlagen, ein Teach-In Verfahren zu verwenden.

WO 2024/067911 A1

## Додаток В

## Код програми модуля збору, конвертації та передачі даних датчиків

```

/*
 * This sketch demonstrates how to scan WiFi networks.
 * The API is based on the Arduino WiFi Shield library, but has significant changes as newer WiFi functions are supported.
 * E.g. the return value of `encryptionType()` different because more modern encryption is supported.
 */
#include "WiFi.h"
#include <PubSubClient.h>

// #include <Wire.h>
#include "DFRobot_SHT20.h"
/**
 * Hardware Connections:
 * -VCC = 3.3V
 * -GND = GND
 * Arduino Nano
 * -SDA = A4 (use inline 330 ohm resistor if your board is 5V)
 * -SCL = A5 (use inline 330 ohm resistor if your board is 5V)
 *
 * ESP32S3 dev
 * -SDA = 8 (Green)
 * -SCL = 9 (Yellow)
 */

DFRobot_SHT20 sht20(&Wire, SHT20_I2C_ADDR);

// WiFi
// enter your creds
const char* ssid = "";
const char* password = "";

// MQTT Broker
// enter IP address of the MQTT broker
const char* mqtt_broker = "";
const int mqtt_port = 1883;

// change in case you need it
const char* topic = "test/esp32/sensor3";
const char* topic_sync = "test/esp32/sync";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  // SHT Init
  Serial.println("Init SHT20");
  sht20.initSHT20(); // Init SHT20 Sensor
  delay(100);
  sht20.checkSHT20();
  Serial.println("Humidity sensor init is finished.");

  //WiFi connect
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.println("Connecting to WiFi..");
  }
  Serial.println("Connected to the WiFi network");

  //MQTT broker connect
  client.setServer(mqtt_broker, mqtt_port);
  client.setCallback(callback);
  mqtt_conn();

  Serial.println("Setup done");
}

```

```

}

void mqtt_conn(){
while (!client.connected()) {
  String client_id = "esp32-client-";
  client_id += String(WiFi.macAddress());
  Serial.printf("The client %s connects to the public MQTT broker\n", client_id.c_str());
  if (client.connect(client_id.c_str())) {
    Serial.println("Public EMQX MQTT broker connected");
  } else {
    Serial.print("failed with state ");
    Serial.print(client.state());
    delay(2000);
  }
}
// Publish and subscribe
client.publish(topic_sync, "Hi, I'm ESP32 ^o-o^");
client.subscribe(topic);
}

void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived in topic: ");
  Serial.println(topic);
  Serial.print("Message:");
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char) payload[i]);
  }
  Serial.println();
  Serial.println("-----");
}

int i = 0;
void loop()
{
if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
  Serial.println("Lost WiFi connection! ");
}
if (!client.connected()){
  Serial.print("Reconnecting to MQTT");
  mqtt_conn();
}

char charVal[10];
float humd = sht20.readHumidity(); // Read Humidity
float temp = sht20.readTemperature(); // Read Temperature
Serial.print(" Temperature: ");
Serial.print(temp, 1);
Serial.print("C");
Serial.print("\t Humidity: ");
Serial.print(humd, 1);
Serial.println("%");
String temp_s = String(dtostrf(temp, 2, 1, charVal));
String humd_s = String(dtostrf(humd, 2, 1, charVal));
String msg = "{"t": " + temp_s + ", \"h\": " + humd_s + "}";
Serial.println(msg);

String msg_sync = "=== " + String(dtostrf(i+=1, 1, 1, charVal)) + "===";

client.publish(topic_sync, msg_sync.c_str());

client.publish(topic, msg.c_str());

// Wait a bit before scanning again.
delay(5000);
Serial.println("Loop ... ");
}

```

## Код docker-compose.yml

```
version: '3.8'

services:
  mosquito:
    image: eclipse-mosquitto:2
    container_name: mosquito
    restart: unless-stopped
    ports:
      - "1883:1883"
      - "9001:9001"
    volumes:
      - mosquito_data:/mosquitto/data
      - ./mosquitto/config:/mosquitto/config

  influxdb:
    image: influxdb:2.7
    container_name: influxdb
    restart: unless-stopped
    ports:
      - "8086:8086"
    environment:
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_MODE=setup
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_USERNAME=${INFLUXDB_USERNAME}
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_PASSWORD=${INFLUXDB_PASSWORD}
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_ORG=${INFLUXDB_ORG}
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_BUCKET=${INFLUXDB_BUCKET}
    volumes:
      - influxdb_data:/var/lib/influxdb2

  grafana:
    image: grafana/grafana-oss
    container_name: grafana
    restart: unless-stopped
    ports:
      - "3000:3000"
    environment:
      - GF_SECURITY_ADMIN_USER=${GRAFANA_USERNAME}
      - GF_SECURITY_ADMIN_PASSWORD=${GRAFANA_PASSWORD}
    volumes:
      - grafana_data:/var/lib/grafana
      - ./grafana/provisioning:/etc/grafana/provisioning
    depends_on:
      - influxdb

  nodered:
    image: nodered/node-red:3.1
    container_name: nodered
    restart: unless-stopped
    ports:
      - "1880:1880"
    volumes:
      - ./nodered/data:/data
    depends_on:
      - mosquito
      - influxdb
      - grafana

  flask-simulator:
    build: ./flask-app
    container_name: flask-simulator
    restart: unless-stopped
    depends_on:
      - mosquito

volumes:
  mosquito_data:
  influxdb_data:
  grafana_data:
```

## Exported Node-RED flow

Note: that is an example. So to run in it properly you MUST configure MQTT and InfluxDB creds

```
[
  {
    "id": "7a61885af7a79b34",
    "type": "tab",
    "label": "KlarsteinDryer",
    "disabled": false,
    "info": "The nodes on this flow were missing a valid flow id when they were imported. They have been added to this flow so you can either restore or delete them.",
    "env": []
  },
  {
    "id": "1",
    "type": "inject",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "Simulate Sensor",
    "props": [
      {
        "p": "payload"
      },
      {
        "p": "topic",
        "vt": "str"
      }
    ],
    "repeat": "",
    "crontab": "",
    "once": false,
    "onceDelay": "",
    "topic": "lab/drier/node_flow/",
    "payload": "{\"sensor_id\":\"node_simulator\", \"weight\":500, \"temperature\":25, \"humidity\":90}",
    "payloadType": "json",
    "x": 170,
    "y": 100,
    "wires": [
      [
        "e9b4e1098298e2f4",
        "5aaa98b1a9bd8ff0"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "e9b4e1098298e2f4",
    "type": "debug",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "debug 1",
    "active": false,
    "tosidebar": true,
    "console": false,
    "tostatus": false,
    "complete": "true",
    "targetType": "full",
    "statusVal": "",
    "statusType": "auto",
    "x": 360,
    "y": 40,
    "wires": []
  },
  {
    "id": "5aaa98b1a9bd8ff0",
    "type": "mqtt out",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "",
    "topic": "",
    "qos": "",
    "retain": "",
    "respTopic": "",
    "contentType": "",
    "userProps": ""
  }
]
```

```

"correl": "",
"expiry": "",
"broker": "d4664316692298ba",
"x": 390,
"y": 100,
"wires": []
},
{
  "id": "a7f110f160e8f308",
  "type": "mqtt in",
  "z": "7a61885af7a79b34",
  "name": "",
  "topic": "lab/drier/klarstein/+/#",
  "qos": "2",
  "datatype": "auto-detect",
  "broker": "d4664316692298ba",
  "nl": false,
  "rap": true,
  "rh": 0,
  "inputs": 0,
  "x": 160,
  "y": 480,
  "wires": [
    [
      "d666e7a85d321080",
      "8fd4978a7b0cae0e"
    ]
  ]
},
{
  "id": "d666e7a85d321080",
  "type": "function",
  "z": "7a61885af7a79b34",
  "name": "rpi_iss",
  "func": "\nmsg.headers = {\n  \"Authorization\": \"Token\n_wfCkc3sXjs4pGTEqZccfok5_64eTX7bWLJxL4baZLKioJCDSPGkJoQRmcRn92U8BKE5qTzin6DCxkfySqkUtA==\", \n  \"Content-Type\": \"text/plain\"\n};\n\nmsg.payload = \n`sensor_data,sensor_id=${msg.payload.sensor_id},source=${msg.topic.includes(\"klarstein\") ? \"Node-RED\" : \"Flask\"} ` +\n`temperature=${msg.payload.temperature},temperature_C=${msg.payload.temperature_C},humidity=${msg.payload.humidity},weight=${msg.payload.weight};\n\nreturn msg;\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": 0,
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 390,
  "y": 480,
  "wires": [
    [
      "540439aac1064d5a"
    ]
  ]
},
{
  "id": "540439aac1064d5a",
  "type": "http request",
  "z": "7a61885af7a79b34",
  "name": "save to the rpi InfluxDB",
  "method": "POST",
  "ret": "obj",
  "paytoqs": "ignore",
  "url": "http://influxdb:8086/api/v2/write?bucket=sensors&org=iss&precision=s",
  "tls": "",
  "persist": false,
  "proxy": "",
  "insecureHTTPParser": false,
  "authType": "",
  "senderr": false,
  "headers": [],
  "x": 710,
  "y": 480,
  "wires": [
    []
  ]
},
}
{

```

```

    "id": "a51e5f5c4eae0fb3",
    "type": "mqtt in",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "",
    "topic": "test/esp32/sensor3/#",
    "qos": "2",
    "datatype": "auto-detect",
    "broker": "d4664316692298ba",
    "nl": false,
    "rap": true,
    "rh": 0,
    "inputs": 0,
    "x": 160,
    "y": 320,
    "wires": [
      [
        "ad37dfd36c7168ce"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "ad37dfd36c7168ce",
    "type": "function",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "rename_and_forward",
    "func": "\nmsg.payload.temperature = msg.payload.t;\nmsg.payload.temperature_C = msg.payload.t_c;\nmsg.payload.humidity =
msg.payload.h;\nmsg.payload.weight = msg.payload.w;\nmsg.topic = \"lab/drier/klarstein/1000w01/\"\nmsg.payload.sensor_id =
\"lab_drier\"\nreturn msg;\n",
    "outputs": 1,
    "timeout": 0,
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 420,
    "y": 320,
    "wires": [
      [
        "89562b5e15fb5089"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "89562b5e15fb5089",
    "type": "mqtt out",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "",
    "topic": "",
    "qos": "",
    "retain": "",
    "respTopic": "",
    "contentType": "",
    "userProps": "",
    "correl": "",
    "expiry": "",
    "broker": "d4664316692298ba",
    "x": 630,
    "y": 320,
    "wires": []
  },
  {
    "id": "8fd4978a7b0cae0e",
    "type": "function",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "prod_influxdb2",
    "func": "\nmsg.headers = {\n  \"Authorization\": \"Token AHj7fUPu-4axb-3qiV9CNj92gYIBf4WaxMj9gbQdghtJbxYu3U-
Mw5KDKt6NiI4cZ91mPdFfljXPAFxtw4iTeA==\",\n  \"Content-Type\": \"text/plain\"\n};\n\nmsg.payload = \n`sensor_data,sensor_id=${msg.payload.sensor_id},source=${msg.topic.includes(\"klarstein\") ? \"Node-RED\" : \"Flask\"}`\n\n`temperature=${msg.payload.temperature},temperature_C=${msg.payload.temperature_C},humidity=${msg.payload.humidity},weight=${
msg.payload.weight}`;\n\nreturn msg;\n",
    "outputs": 1,
    "timeout": 0,
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 420,
  }
}

```

```

    "y": 540,
    "wires": [
      [
        "61c8f6d3e49048b4"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "61c8f6d3e49048b4",
    "type": "http request",
    "z": "7a61885af7a79b34",
    "name": "save to the server InfluxDB",
    "method": "POST",
    "ret": "obj",
    "paytoqs": "ignore",
    "url": "http://influxdb.prod.local/api/v2/write?bucket=sensors&org=iss&precision=s",
    "tls": "",
    "persist": false,
    "proxy": "",
    "insecureHTTPParser": false,
    "authType": "",
    "senderr": false,
    "headers": [],
    "x": 720,
    "y": 540,
    "wires": [
      []
    ]
  },
  {
    "id": "d4664316692298ba",
    "type": "mqtt-broker",
    "name": "iss",
    "broker": "mosquitto",
    "port": "1883",
    "clientid": "",
    "autoConnect": true,
    "usetls": false,
    "protocolVersion": "4",
    "keepalive": "60",
    "cleansession": true,
    "autoUnsubscribe": true,
    "birthTopic": "",
    "birthQos": "0",
    "birthRetain": "false",
    "birthPayload": "",
    "birthMsg": {},
    "closeTopic": "",
    "closeQos": "0",
    "closeRetain": "false",
    "closePayload": "",
    "closeMsg": {},
    "willTopic": "",
    "willQos": "0",
    "willRetain": "false",
    "willPayload": "",
    "willMsg": {},
    "userProps": "",
    "sessionExpiry": ""
  }
]

```