

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Малащук Наталія Савівна

УДК 664.8.047:621.577

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПРЯНО-АРОМАТИЧНОЇ
СИРОВИНИ В ТЕПЛОНАСОСНІЙ СУШАРЦІ

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

_____ Н.С. Малащук

Науковий керівник – Снежкін Юрій Федорович, академік НАН України,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Малащук Н.С. Інтенсифікація процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини в теплонасосній сушарці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена обґрунтуванню методів інтенсифікації процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини та розробленню енергоефективних режимів сушіння, при яких забезпечується максимальне збереження ефірних олій.

Особливістю сушіння пряно-ароматичної сировини є залежність якості готового продукту від температурного рівня процесу та тривалості теплової дії. Пряно-ароматична сировина містить в собі цінні ароматичні леткі речовини ефірних олій та смакові сполуки, які зазвичай є дуже чутливими до впливу високих температур. При перевищенні максимально допустимої температури нагріву відбуваються необоротні зміни фізичної та хімічної структури матеріалу, втрати ефірних олій, що у свою чергу призводить до погіршення якісних показників.

Сушіння пряно-ароматичної сировини при низьких температурах – довготривалий процес, здійснення якого в конвективних сушарках є не вигідним, через їхню низьку ефективність, що пов'язана із значними втратами теплоти з відпрацьованим повітрям (більше 20 % в загальному тепловому балансі). Традиційні методи інтенсифікації процесу сушіння шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента мають обмеження під час зневоднення пряно-ароматичних рослин через термочутливість ефірних олій. Пришвидшити процес низькотемпературного сушіння пряно-ароматичної сировини можливо збільшенням рушійної сили

масообміну (масообмінного напору) шляхом примусового осушення сушильного агента.

Для реалізації енергоефективних режимів низькотемпературного сушіння пряно-ароматичної сировини з регулюванням вологовмісту сушильного агента запропоновано використання конденсаційного методу сушіння з застосуванням теплового насосу.

Теплонасосні сушарки вирізняються високою ефективністю при низькотемпературному сушінні. В теплонасосній сушарці можливо здійснити утилізацію теплоти відпрацьованого сушильного агента та повернути її в технологічний процес на більш високому температурному рівні. Таким чином за рахунок утилізації теплоти конденсації вологи сушильного агента енерговитрати в такій сушарці зменшуються майже в 3 рази в порівнянні з традиційною конвективною сушаркою. Застосування теплового насосу дозволяє за рахунок примусового осушення повітря, незалежно від умов навколишнього середовища, підтримувати необхідні тепловологісні параметри сушильного агента та створювати керовані умови технологічного процесу зневоднення, що гарантує високу якість готового продукту.

Теплонасосне сушіння використовуються в переробці пряно-ароматичної сировини в Україні, Італії, Німеччині, Колумбії та в інших країнах.

В процесі теплонасосного сушіння величина поточних енерговитрат значною мірою залежить від вологовмісту сушильного агента і температурного режиму його осушення у випарнику теплового насоса. Для кожного заданого тепловологісного стану сушильного агента визначений оптимальний температурний режим роботи теплового насоса, який забезпечує мінімальні енерговитрати на сушіння пряно-ароматичної сировини.

У вступі обгрунтовано актуальність обраної теми досліджень, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Надано дані про апробацію

результатів дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами та перелік публікацій.

У першому розділі проаналізовані біохімічні і структурні властивості пряно-ароматичної сировини як об'єкту сушіння та показано, що для науково обґрунтованого вибору методів і режимів зневоднення рослинних матеріалів необхідне визначення сорбційних властивостей і термодинамічних характеристик матеріалів, а також експериментальне дослідження кінетики вологовидалення, проведено аналіз літературних джерел сучасних способів сушіння пряно-ароматичної сировини.

У другому розділі описані методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.

Сорбційні характеристики пряно-ароматичної сировини вивчалися тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена. Теплофізичні характеристики пряно-ароматичної сировини досліджувалась за допомогою установки синхронного теплового аналізу. Процеси сушіння досліджувалися на лабораторній сушильній установці з конвективним підведенням теплоти в горизонтальній камері. Визначення теплових характеристик полімерного рекуперативного теплообмінника проводилися за допомогою експериментальної установки теплообмінника-рекуператора типу "повітря-повітря".

Наведені принципові схеми експериментальних установок, описані методики проведення досліджень, визначені показники точності вимірювання та межі допустимої похибки.

У третьому розділі були надані результати та аналіз комплексних досліджень пряно-ароматичної сировини як об'єкта сушіння. Проведені дослідження сорбційних властивостей пряно-ароматичних трав. Експериментально одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти перцевої та виявлений вплив летких речовин ефірної олії м'яти на теплоту випаровування. Надані результати експериментальних досліджень кінетики

процесу сушіння і визначені основні закономірності тепломасообміну при зневодненні пряно-ароматичної сировини.

У четвертому розділі був приведений аналіз технологічних схем включення теплових насосів у теплогенеруючі системи конвективних сушарок. Розроблена методика розрахунку процесу сушіння в теплонасосній сушарці з рекуперацією "холоду". Проведені дослідження впливу тепловологісних параметрів сушильного агента на енергетичні показники роботи теплового насосу.

У п'ятому розділі описані вимоги до теплонасосної сушарки для пряно-ароматичної сировини. За результатами експериментальних досліджень спроектований та виготовлений теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат. Проведені експериментальні дослідження теплових характеристик рекуперативного полімерного теплообмінника. За даними дослідженнями була створена конвективна теплонасосна сушильна установка.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- визначені залежності парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту та температури для м'яти перцевої та встановлено, що в міру зменшення вологовмісту матеріалу при зниженні його температури тиск пари води на поверхні зменшується. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну (Δp). Показано, що найбільш дієвим механізмом інтенсифікації процесу є збільшення масообмінного напору шляхом зниження парціального тиску водяної пари в сушильному агенті;

- експериментально одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти перцевої при температурах 40 і 50 °С та виявлений вплив летких речовин ефірної олії м'яти на теплоту випаровування;

- встановлені температурно-вологісні параметри сушильного агента, при яких мінімізується випаровування летких ароматичних сполук із сировини;
- досліджені кінетичні закономірності конвективного сушіння пряно-ароматичної сировини, визначено оптимальні режими процесу;
- одержані емпіричні рівняння кривих сушіння м'яти перцевої, виведена узагальнена залежність для визначення тривалості процесу зневоднення;
- обґрунтована необхідність використання ступеневих режимів сушіння зі змінюваним ступенем осушування сушильного агента за отриманими даними з гіротермічної рівноваги та кінетики сушіння м'яти перцевої;
- досягнуто зниження енерговитрат процесу сушіння, за рахунок термодинамічної та фізичної рекуперації теплоти сушильного агента;
- одержані теплові характеристики полімерного рекуперативного теплообмінника.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів:

- розроблені енергоефективні режими сушіння пряно-ароматичної сировини в конвективній сушарці з використанням теплового насосу;
- розроблена методика розрахунку процесу сушіння в теплонасосній сушарці з рекуператором "холоду";
- розроблений експериментальний стенд для дослідження рекуперативного теплообмінника;
- розроблений та впроваджений теплонасосний агрегат для конвективної сушарки;
- одержані теплові характеристики полімерного рекуперативного теплообмінника.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується актами випробування та впровадження:

1. Випробування теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегата для конвективної сушарки камерного типу № 114 від 03.09.2020. 2. Промислових випробувань та впровадження теплогенеруючого теплонасосного агрегата для конвективної сушарки камерного типу від 12.11.2020. 3. Про прийняття в експлуатацію дослідно-промислового зразка теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу від 1.12.2020.

Ключові слова: пряно-ароматична сировина, м'ята перцева, ефірна олія, сушіння, енергоефективність, тепломасообмін, тепловий насос, теплообмінник, сушарка.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Уланов М.М., & Малащук Н.С. (2020). Ефективність використання теплових насосів в процесах сушіння. Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016-2020 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (С. 410-420). Київ. *(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)*.
2. Дабіжа Н.О., Чалаєв Д.М., Малащук Н.С. & Базєєв Р.Е. (2021). Експериментальні дослідження теплопередачі у рекуператорі конвективної сушарки. Енергоефективність процесів сушіння. Київ, 245-253. *(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)*.
3. N.S. Malashchuk, D.M Chalaev., & N.O. Dabizha (2021). Experimental investigation of heat transfer in a recuperator of a convective dryer. SWorldJournal. Болгарія, №8 ч.1. С. 42-49. *(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)*.
4. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Енергоресурсозберігаючі технології зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 43, № 4, с. 7 – 16. *(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)*.
5. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Дмитренко Н.В. & Малащук Н.С. (2023). Сорбційні та термодинамічні властивості пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 45, № 2, с. 5 – 14. *(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)*.

6. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Тельніков Є.Я., Вишнівський В.М. & Малащук Н.С. (2023). Ефективна камерна сушарка з тавстоплівковими нагрівальними елементами. Енерготехнології та ресурсозбереження, Том 75, № 2, с. 85 – 96. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О. & Малащук Н.С. (2018). Оптимізація температурних режимів роботи теплонасосного агрегату в процесах конвективного сушіння. Збірник матеріалів 5-го Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 26–29 вересня 2018 року, Львів. — Львів : Видавництво Львівської політехніки — С. 156. — (Інноваційні природоохоронні технології. Технології підвищення ефективності використання матеріалів, води та енергії) (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
8. Дабіжа Н. О., Снежкін Ю.Ф. & Малащук Н.С. (2019). Конвективне сушіння з використанням теплового насоса. Збірник наукових праць "ЛОГОΣ" за матеріалами конференції Наукова та міжнародна практика, Бордо, 3 березня 2019. Бордо: ОП «Європейська наукова платформа», с. 73-74. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
9. Natalia Dabizha, Yurii Sniezhkin, Djamel Chalaev & Nataliia Malashchuk (2019). Research in low-temperature heat pump drying. 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. – June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 433 p. DOI: <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.098>. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Малащук Н.С. & Гусарова О.В. (2019). Інтенсифікація тепломасоперенесення при зневодненні термолабільних матеріалів. VI Всеукр. наук.-практ. Конференція «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини», 6–7 червня 2019 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Х. : ХДУХТ, с. 53-54 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
11. Герштун Д., Малащук Н. & Базеев Р. (2021). Дослідження енергетичних характеристик в полімерному теплообміннику-утилізаторі. Тези XXIII міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність в XXI столітті» 19-20 травня, Київ, с.288 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
12. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Теплонасосне сушіння лікарських та пряно-ароматичних рослин. Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ. с. 92 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
13. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Енергоефективна теплонасосна сушарка для зневоднення пряно-ароматичної сировини. Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ. с. 95 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
14. Dmytrenko N.V., Malashchuk N.S., Dabizha N.O. & Ivanov S.O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves (2022). II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research». September; Valencia, Spain. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-16.09.2022> (Внесок здобувача: проведення

експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Снежкін Ю.Ф. & Малащук Н.С. (2019). Низькотемпературне сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Збірник тез доповідей XVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (22-23 квітня 2019 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», с. 21-22 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
16. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О. & Малащук Н.С. (2019). Теплонасосна сушильна установка. Матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 15-16 травня, Київ.– К.: Інтерсервіс, С. 621-624 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
17. Dabizha N., Sniezhkin Yu. & Malashchuk N. (2020). Drying performance of thermolabs materials at low temperatures. Abstracts of X International Scientific and Practical Conference «Scientific achievements of modern society» Liverpool, United Kingdom 27-29 May. 121–124 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
18. Дабіжа Н.О., Чалаєв Д.М., Базеєв Р.Є. & Малащук Н.С. (2021). Дослідження полімерного перехреснотічного теплообмінника «повітря-повітря». Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ с. 95 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

- 19.Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Технології сушіння пряно-ароматичних рослин. Тези XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. 24-26 травня, Київ. с.126 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
- 20.Dabizha N., Sniezhkin Yu. & Malashchuk N. (2021). Technologies for drying spicy-aromatic plants. Тези XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. 24-26 травня, Київ. с.129 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
- 21.Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2022). Research of dehydration processes of medicinal and spicy-aromatic plants. Тези XIII міжнародної науково-практичної конференції "Modern scientific research Achievements, and development prospects" 19-22 червня, Берлін ст. 5 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

ABSTRACT

Malashchuk N.S. Intensification of the process of dehydration of aromatic raw materials in a heat pump dryer. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 - thermal power engineering. – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation work is devoted to the substantiation of the methods of intensification of the process of dehydration of spicy and aromatic raw materials and the development of energy-efficient drying modes that ensure maximum preservation of essential oils.

The peculiarity of drying spicy and aromatic raw materials is the dependence of the quality of the finished product on the temperature level of the process and the duration of the thermal action. Spicy-aromatic raw materials contain valuable aromatic volatile substances of essential oils and flavor compounds, which are usually very sensitive to the influence of high temperatures. When the maximum permissible heating temperature is exceeded, irreversible changes in the physical and chemical structure of the material occur, loss of essential oils, which in turn leads to deterioration of quality indicators.

Drying of spicy and aromatic raw materials at low temperatures is a long-term process, the implementation of which in convective dryers is unprofitable, due to their low efficiency, which is associated with significant heat losses with exhaust air (more than 20% in the total heat balance). Traditional methods of intensifying the drying process by increasing the temperature and speed of the drying agent have limitations during the dehydration of aromatic plants due to the thermal sensitivity of essential oils. It is possible to speed up the process of low-temperature drying of spicy and aromatic raw materials by increasing the driving force of mass transfer (mass transfer pressure) by forced drying of the drying agent.

To implement energy-efficient modes of low-temperature drying of spicy-aromatic raw materials with regulation of the moisture content of the drying agent, the use of a condensation drying method using a heat pump is proposed.

Heat pump dryers are characterized by high efficiency at low temperature drying. In a heat pump dryer, it is possible to utilize the heat of the spent drying agent and return it to the technological process at a higher temperature level. Thus, due to utilization of the heat of moisture condensation of the drying agent, the energy consumption in such a dryer is reduced by almost 3 times compared to a traditional convective dryer. The use of a heat pump allows, due to forced drying of the air, regardless of the environmental conditions, to maintain the necessary thermo-humid parameters of the drying agent and to create controlled conditions for the technological process of dehydration, which guarantees the high quality of the finished product.

Heat pump drying is used in the processing of spicy and aromatic raw materials in Ukraine, Italy, Germany, Colombia and other countries.

In the process of heat pump drying, the amount of current energy consumption largely depends on the moisture content of the drying agent and the temperature regime of its drying in the evaporator of the heat pump. For each given heat-moisture state of the drying agent, the optimal temperature regime of the heat pump operation is determined, which ensures minimum energy costs for drying spicy and aromatic raw materials.

The introduction substantiates the relevance of the chosen research topic, formulates the goal and task of the research, outlines the scientific novelty and practical significance of the obtained results. Data on the approval of the results of the dissertation are provided, the connection of the work with scientific programs, plans and topics and a list of publications are shown.

In the first chapter, the biochemical and structural properties of spicy-aromatic raw materials as an object of drying are analyzed and it is shown that for a scientifically based choice of methods and modes of dehydration of plant materials, it is necessary to determine the sorption properties and thermodynamic

characteristics of materials, as well as an experimental study of the kinetics of moisture removal, an analysis of literary sources of modern methods of drying spicy and aromatic raw materials.

The second chapter describes methods for conducting and processing the results of experimental studies.

Sorption characteristics of spicy and aromatic raw materials were studied by the tensometric (static) method of Van Bamelén. Thermophysical characteristics of spicy-aromatic raw materials were studied using a synchronous thermal analysis setup. Drying processes were studied on a laboratory drying unit with convective heat supply in a horizontal chamber. Determination of the thermal characteristics of the polymer recuperative heat exchanger was carried out using an experimental installation of an air-to-air heat exchanger-recuperator.

The principle schemes of experimental installations are given, the research methods are described, the indicators of measurement accuracy and the limits of permissible error are determined.

In the third chapter, the results and analysis of comprehensive research on spicy-aromatic raw materials as an object of drying were provided. Studies of the sorption properties of spicy and aromatic herbs have been conducted. Experimentally obtained specific heat consumption for drying peppermint leaves and revealed the effect of volatile substances of mint essential oil on the heat of evaporation. The results of experimental studies of the kinetics of the drying process are given and the main regularities of heat and mass exchange during the dehydration of spicy and aromatic raw materials are determined.

In the fourth chapter, an analysis of technological schemes for including heat pumps in heat-generating systems of convective dryers was given. A method of calculating the drying process in a heat pump dryer with "cold" recovery has been developed. Studies of the effect of heat-moisture parameters of the drying agent on the energy performance of the heat pump have been conducted.

The fifth chapter describes the requirements for a heat pump dryer for spicy and aromatic raw materials. Based on the results of experimental studies, a heat-

generating, dehumidifying heat pump unit was designed and manufactured. Experimental studies of the thermal characteristics of the recuperative polymer heat exchanger were conducted. Based on these studies, a convective heat pump drying unit was created.

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

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- the dependence of the partial pressures of water vapor on the surface of the material on the moisture content and temperature for peppermint was determined, and it was established that as the moisture content of the material decreases, as its temperature decreases, the water vapor pressure on the surface decreases. At the same time, the driving force of mass transfer (Δp) decreases. It is shown that the most effective process intensification mechanism is an increase in the mass exchange pressure by reducing the partial pressure of water vapor in the drying agent;

- experimentally obtained specific heat consumption for drying peppermint leaves at temperatures of 40 and 50 °C and revealed the effect of volatile substances of mint essential oil on the heat of evaporation;

- the temperature and humidity parameters of the drying agent are set, at which the evaporation of volatile aromatic compounds from the raw materials is minimized;

- the kinetic regularities of convective drying of spicy and aromatic raw materials were investigated, the optimal modes of the process were determined;

- obtained empirical equations of peppermint drying curves, derived a generalized dependence for determining the duration of the dehydration process;

- the justified need to use staged drying modes with a variable degree of drying of the drying agent based on the data obtained from hygrothermal equilibrium and drying kinetics of peppermint;

- a reduction in the energy consumption of the drying process was achieved due to the thermodynamic and physical heat recovery of the drying agent;

- obtained thermal characteristics of the polymer recuperative heat exchanger.

Theoretical and practical significance of the obtained results:

- developed energy-efficient modes of drying spicy and aromatic raw materials in a convective dryer using a heat pump;
- a methodology for calculating the drying process in a heat pump dryer with a "cold" recuperator was developed;
- developed an experimental stand for recuperative heat exchanger research;
- developed and implemented heat pump unit for convective dryer;
- a heat pump drying unit was created.

The practical significance of the results of the dissertation work is confirmed by acts of testing and implementation:

1. Testing of the heat-generating drying heat pump unit for the chamber-type convective dryer No. 114 dated September 3, 2020. 2. Industrial testing and implementation of a heat-generating heat pump unit for a chamber-type convective dryer from 11/12/2020. 3. On acceptance into operation of a research and industrial sample of a heat-generating drying heat pump unit for a chamber-type convective dryer as of December 1, 2020.

Key words: aromatic raw materials, peppermint, essential oil, drying, energy efficiency, heat and mass exchange, heat pump, heat exchanger, dryer.

LIST OF PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Snezhkin Y.F., Chalaev D.M., Dabyzha N.O., Ulanov M.M., & Malashchuk N.S. (2020). The efficiency of using heat pumps in drying processes. Reliability and durability of materials, structures, equipment and buildings: Collection of scientific articles based on the results obtained in 2016-2020 / Institute of Electric Welding named after E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine (pp. 410-420). Kyiv. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
2. Dabyzha N.O., Chalaev D.M., Malashchuk N.S. & Bazeev R.E. (2021). Experimental studies of heat transfer in the recuperator of a convective dryer. Energy efficiency of drying processes. Kyiv, 245-253. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
3. N.S. Malashchuk, D.M Chalaev., & N.O. Dabizha (2021). Experimental investigation of heat transfer in a recyperator of a convective dryer. SWorldJournal. България, №8 ч.1. С. 42-49. ((Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
4. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O. & Malashchuk N.S. (2021). Energy-saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. Thermophysics and Thermoenergetics, Volume 43, No. 4, p. 7 – 16. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
5. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O., Dmytrenko N.V. & Malashchuk N.S. (2023). Sorption and thermodynamic properties of spicy-aromatic plants as drying objects. Thermophysics and Thermoenergetics, Volume 45, No. 2, p. 5 – 14.

(Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

6. Snezhkin Y.F., Petrova Zh.O., Pazyuk V.M., Telnikov E.Ya., Vyshnevskiy V.M. & Malashchuk N.S. (2023). Efficient chamber dryer with thick film heating elements. *Energy technologies and resource conservation*, Volume 75, No. 2, p. 85 – 96. (Contribution of the acquirer: conducting experimental research).

Scientific works confirming the approbation of the materials of the thesis:

7. Snezhkin Y.F., Chalayev D.M., Dabyzha N.O., Shapar R.O. & Malashchuk N.S. (2018). Optimizing the temperature regimes of heat pump unit operation in convective drying processes. *Proceedings of the 5th International Congress "Environmental Protection. Energy saving. Balanced use of nature"*, September 26-29, 2018, Lviv. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic — P. 156. — (Innovative environmental protection technologies. Technologies for increasing the efficiency of materials, water and energy use) (Contribution of the acquirer: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
8. Dabyzha N.O., Snezhkin Y.F. & Malashchuk N.S. (2019). Convective drying using a heat pump. *Collection of scientific papers "ΛΟΓΟΣ"* based on the materials of the Scientific and International Practice conference, Bordeaux, March 3, 2019. Bordeaux: OP "European Scientific Platform", p. 73-74. (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
9. Natalia Dabizha, Yurii Sniezshkin, Djamal Chalaev & Nataliia Malashchuk (2017). Research in low-temperature heat pump drying. *2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings.* – June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 433 p. DOI: <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.098>.

- Contribution of the acquirer: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
10. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O., Malashchuk N.S. & Husarova O.V. (2019). Intensification of heat and mass transfer during dehydration of thermolabile materials. VI All-Ukrainian science and practice Conference "Problems of energy efficiency and quality in processes of drying food raw materials", June 6-7, 2019: [theses] / editor.: O. I. Cherevko [and others]. - Kh.: KhDUHT, p. 53-54 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
 11. Gershtun D., Malashchuk N. & Bazeev R. (2021). Study of energy characteristics in a polymer heat exchanger-utilizer. Abstracts of the 23rd international scientific and practical online conference "Renewable energy and energy efficiency in the 21st century" May 19-20, Kyiv, p. 288 (Contribution of the applicant: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
 12. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O. & Malashchuk N.S. (2021). Heat pump drying of medicinal and aromatic plants. Abstracts of the 12th international online conference "Problems of thermal physics and thermal energy" October 26-27, Kyiv. with. 92 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
 13. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O. & Malashchuk N.S. (2021). Energy-efficient heat pump dryer for dehydrating spicy and aromatic raw materials. Abstracts of the 12th international online conference "Problems of thermal physics and thermal energy" October 26-27, Kyiv. with. 95 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
 14. Dmytrenko N.V., Malashchuk N.S., Dabizha N.O. & Ivanov S.O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves (2022). II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research». September; Valencia,

Spain. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-16.09.2022> (Contribution of the applicant: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).

***Scientific works, which additionally represent the scientific results of
the thesis:***

15. Snezhkin Yu.F. & Malashchuk N.S. (2019). Low-temperature drying of colloidal capillary-porous materials. Collection of abstracts of reports of the XVI international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Resource-energy-saving technologies and equipment" (April 22-23, 2019, Kyiv) / Compiled by Y.M. Kornienko. - K.: "KPI named after Igor Sikorsky", p. 21-22 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
16. Snezhkin Y.F., Chalayev D.M., Dabyzha N.O., Shapar R.O. & Malashchuk N.S. (2019). Heat pump drying unit. Materials of the 20th international scientific and practical conference "Renewable energy and energy efficiency in the 21st century", May 15-16, Kyiv. - K.: Interservice, pp. 621-624 (Contribution of the acquirer: conducting experimental research, processing and analysis of experimental data).
17. Dabizha N., Sniezshkin Yu. & Malashchuk N. (2020). Drying performance of thermolabs materials at low temperatures. Abstracts of X International Scientific and Practical Conference «Scientific achievements of modern society» Liverpool, United Kingdom 27-29 May. 121–124 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
18. Dabyzha N.O., Chalaev D.M., Bazeev R.E. & Malashchuk N.S. (2021). Study of the polymer air-to-air cross-flow heat exchanger. Abstracts of the 12th international online conference "Problems of thermal physics and thermal energy" October 26-27, Kyiv, p. 95 (Contribution of the acquirer:

conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

19. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O. & Malashchuk N.S. (2021). Technologies of drying spicy and aromatic plants. Abstracts of the XXII international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. May 24-26, Kyiv. p.126 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
20. Dabizha N., Sniezhkin Yu. & Malashchuk N. (2021). Technologies for drying spicy-aromatic plants. Abstracts of the XXII international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. May 24-26, Kyiv. p.129 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).
21. Snezhkin Y.F., Dabyzha N.O. & Malashchuk N.S. (2022). Research of dehydration processes of medicinal and spicy-aromatic plants. Abstracts of the 13th international scientific and practical conference "Modern scientific research Achievements, and development prospects" June 19-22, Berlin st. 5 (Contribution of the acquirer: conducting experimental studies, processing and analysis of experimental data).

ЗМІСТ

ВСТУП	26
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
1.1 Пряно-ароматична сировина як об’єкт сушіння	33
1.2 Аналіз методів зневоднення пряно-ароматичної сировини і сушильного устаткування.....	41
1.4 Висновок до розділу 1	55
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	57
2.1 Методика дослідження адсорбційних властивостей матеріалів	57
2.2 Експериментальна установка і методика проведення досліджень теплофізичних характеристик за допомогою установки синхронного теплового аналізу	60
2.3 Експериментальна установка і методика проведення досліджень кінетики процесу сушіння	63
2.4 Експериментальна установка і методика проведення досліджень теплообмінника-рекуператора типу “повітря-повітря”	67
2.5 Розрахунок похибок.....	77
Висновки до розділу 2	82
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	83
3.1 Сорбційні властивості пряно-ароматичної сировини	83
3.2 Визначення питомої теплоти випаровування.....	86
3.3 Експериментальні та аналітичні дослідження кінетики процесу сушіння пряно-ароматичної сировини.....	91
3.4 Обґрунтування шляхів інтенсифікації процесу зневоднення та розроблення енергоефективних режимів сушіння	101
Висновки до розділу 3	103
4 ОБґРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ ПРЯНО-АРОМАТИЧНОЇ СИРОВИНИ	106

4.1 Аналіз технологічних схем включення теплових насосів у теплогенеруючі системи конвективних сушарок.....	106
4.2 Розрахунок процесу теплонасосного сушіння в H-d діаграмі вологого повітря	111
4.3 Дослідження впливу тепловологісних параметрів сушильного агента на енергетичні показники роботи теплового насосу	115
Висновки до розділу 4	119
5 РОЗРОБЛЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ КОНВЕКТИВНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СУШАРКИ.....	121
5.1 Вимоги до теплонасосної сушарки	121
5.2 Теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат	124
5.3 Конвективна теплонасосна сушильна установка.....	128
5.4 Енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія	131
5.5 Розроблення та дослідження рекуператоративного полімерного теплообмінника типу «повітря-повітря»	137
Висновки до розділу 5	146
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	147
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	150

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ІНДЕКСІВ

c – питома теплоємність, кДж/кг·К

d – вологовміст сушильного агента, г/кг с.п.;

h – товщина, м;

m – маса, кг;

p – тиск, мм рт.ст.;

p/p_s – відносний тиск;

q – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг;

r – теплота паротворення, кДж/кг;

T – температура, К;

t – температура, °С;

u – вологовміст матеріалу, кг/кг с.м.;

V – об'єм, м³;

v – швидкість, м/с;

W – вологовміст матеріалу, %;

φ – відносна вологість повітря;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, кВт/м·К;

ρ – густина матеріалу, кг/м³;

τ – час, хв.

ВСТУП

В теперішній час зростаючі потреби в нових високоякісних продуктах і енергозберігаючих процесах, а так само проблеми захисту навколишнього середовища стимулюють дослідження і розробки в області технології та техніки сушіння.

Високий попит на пряно-ароматичні трави в фармацевтичній харчовій, біотехнологічній, та косметичній, промисловостях зумовив підвищені вимоги до технологічних процесів переробки пряно-ароматичної сировини для збереження біологічно активних речовин і ефірних олій.

Важливим етапом в процесі заготівлі пряно-ароматичних рослин є сушіння, яке запобігає псуванню сировини та збільшує термін зберігання продукту. Проте під час сушіння при підвищених температурах термочутливі компоненти рослин (ефірні олії) не зберігаються, що призводить до змінювання аромату, смаку та кольору.

Сушіння пряно-ароматичних трав здійснюється природним повітряно-тіньовим способом або нагрітим повітрям в сушильних установках. При природному сушінні процес зневоднення суттєво залежить від тепловологісних параметрів атмосферного повітря, які в нестабільних кліматичних умовах України змінюються в широкому діапазоні, що не дозволяє проводити зневоднення в сталих оптимальних умовах і призводить до неможливості одержати кінцевий продукт з необхідними якісними показниками. Сушіння нагрітим повітрям має ряд переваг: у сушарках можливо регулювати температурний режим процесу, швидкість та вологовміст сушильного агента. Організація контрольованого процесу сушіння дозволяє реалізувати оптимальні з точки зору збереження біологічно активних речовин пряно-ароматичної сировини режими.

Проте сушіння нагрітим повітрям вимагає великих витрат енергії. Ця проблема обумовлена низькою енергетичною ефективністю сушарок, яка пов'язана з великими непродуктивними витратами теплоти. Найбільші

нерациональні втрати теплоти пов'язані с відпрацьованим сушильним агентом (більше 20 % в загальному тепловому балансі).

Вибір параметрів процесу сушіння пряно-ароматичної сировини визначається термочутливістю летких ароматичних сполук ефірних олій. Для запобігання втрат летких речовин температура нагріву пряно-ароматичних трав не повинна перевищувати 40-50 . Але при низьких температурах сушіння значно зменшується інтенсивність зневоднення, збільшується його тривалість, що погіршує енергетичні показники процесу.

Тому рішення питань зниження енерговитрат на видалення вологи, інтенсифікації процесу зневоднення при сушінні пряно-ароматичної сировини та максимального збереження ефірних олій є актуальним науково-технічним завданням.

Перспективним напрямком вирішення даного завдання є використання конденсаційного методу сушіння з застосуванням теплового насосу для реалізації енергоефективних режимів низькотемпературного сушіння пряно-ароматичної сировини. Застосування теплового насосу дозволяє за рахунок примусового осушення повітря, незалежно від умов навколишнього середовища, підтримувати необхідні тепловологісні параметри сушильного агента та створювати керовані умови технологічного процесу зневоднення, що гарантує високу якість готового продукту. Також за рахунок утилізації теплоти конденсації вологи сушильного агента енерговитрати в такій сушарці зменшуються майже в 3 рази в порівнянні з традиційною конвективною сушаркою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає науковій тематиці Інституту технічної теплофізики НАН України та виконувалась у відділі «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» за державними тематиками «Наукові засади підвищення енергоефективності теплотехнологій при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів» (ДР 0112U002650), «Інтенсифікація тепломасопереносу

при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та розроблення енергоефективного сушильного обладнання» (ДР0120U103352) та за цільвою програмою наукових досліджень НАН України «Подовження терміну експлуатації сушильного обладнання шляхом удосконалення теплогенеруючих систем» (№ ДР 0116U006295), у якій автор бере участь як виконавець, приймає участь в проведенні експериментальних досліджень, аналізі та обробці дослідних даних, підготовці публікацій.

Мета і задачі досліджень. Обґрунтування методів інтенсифікації процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини, удосконалення сушильного обладнання та розроблення енергоефективних режимів сушіння, при яких забезпечується максимальне збереження ефірних олій.

Поставлена мета досягається в результаті вирішення таких основних завдань:

- аналіз літературних джерел щодо впливу температури сушіння на вміст ефірних олій у висушених пряно-ароматичних травах, визначення гранично допустимої температури нагріву м'яти перцевої;
- дослідження сорбційних властивостей м'яти перцевої, визначення чистої ізостеричної теплоти адсорбції;
- визначення теплоти випаровування в процесі теплового сушіння м'яти перцевої;
- дослідження залежності кінетики процесу сушіння м'яти перцевої, від тепловологісних параметрів сушильного агента;
- вибір та обґрунтування методу інтенсифікації процесу низько температурного сушіння м'яти перцевої;
- розроблена енергоефективних режимів зневоднення м'яти перцевої та вибір способу сушіння;
- аналітичні дослідження процесу теплонасосного сушіння, визначення енергетичних показників;
- розроблення конструктивної схеми теплонасосного агрегату;

- дослідження рекуперативного полімерного теплообмінника.

Об'єкт дослідження – процес конвективного сушіння термолабільних матеріалів.

Предмет дослідження – процес сушіння пряно-ароматичної сировини з застосуванням теплового насосу.

Методи дослідження: теоретичний аналіз процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини, напівемпіричні методи моделювання процесу, експериментальні дослідження процесу сушіння, визначення достовірності результатів моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначені залежності парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту та температури для м'яти перцевої та встановлено, що в міру зменшення вологовмісту матеріалу при зниженні його температури тиск пари води на поверхні зменшується. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну (Δp). Показано, що найбільш дієвим механізмом інтенсифікації процесу є збільшення масообмінного напору шляхом зниження парціального тиску водяної пари в сушильному агенті;

- експериментально одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти перцевої при температурах 40 і 50 °С та виявлений вплив летких речовин ефірної олії м'яти на теплоту випаровування;

- встановлені температурно-вологісні параметри сушильного агенту, при яких мінімізується випаровування летких ароматичних сполук із сировини;

- досліджені кінетичні закономірності конвективного сушіння пряно-ароматичної сировини, визначено оптимальні режими процесу;

- одержані емпіричні рівняння кривих сушіння м'яти перцевої, виведена узагальнена залежність для визначення тривалості процесу зневоднення;

- обґрунтована необхідність використання ступеневих режимів сушіння зі змінюваним ступенем осушування сушильного агента за отриманими даними з гіротермічної рівноваги та кінетики сушіння м'яти перцевої;
- досягнуто зниження енерговитрат процесу сушіння, за рахунок термодинамічної та фізичної рекуперації теплоти сушильного агента;
- одержані теплові характеристики полімерного рекуперативного теплообмінника.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів:

- розроблені енергоефективні режими сушіння пряно-ароматичної сировини в конвективній сушарці з використанням теплового насосу;
- розроблена методика розрахунку процесу сушіння в теплонасосній сушарці з рекуператором "холоду";
- розроблений експериментальний стенд для дослідження рекуперативного теплообмінника;
- розроблений та впровадженний теплонасосний агрегат для конвективної сушарки;
- одержані теплові характеристики полімерного рекуперативного теплообмінника.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується актами випробування та впровадження:

1. Випробування теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегата для конвективної сушарки камерного типу № 114 від 03.09.2020. 2. Промислових випробувань та впровадження теплогенеруючого теплонасосного агрегата для конвективної сушарки камерного типу від 12.11.2020. 3. Про прийняття в експлуатацію дослідно-промислового зразка теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу від 1.12.2020.

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні і доказі наукових положень, постановці та проведенні експериментальних досліджень і отриманні наукових результатів вказаних у дисертації. Підготовка доповідей та статей.

Апробація результатів магістерської дисертації.

Основні результати роботи обговорювались та отримали схвалення на міжнародному конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів 2018); на конференції Наукова та міжнародна практика, «Європейська наукова платформа» (Бордо, 2019), 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Lviv 2019); VI Всеукр. наук.-практ. конференція «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (Харків 2019); XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ 2021), XXIII міжнародна науково-практична онлайн-конференція «Відновлювальна енергетика та енергоефективність в XXI столітті» (Київ 2021); II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research» (Valencia 2022).

Публікації.

Основні положення та наукові результати викладено у 21 публікаціях наукових робіт, у тому числі: 6 статей у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 1 стаття представлена у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS; 2 статті у наукових виданнях України; 1 стаття представлена у закордонному спеціалізованому виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus; 2 розділи у співавторстві у колективних

монографіях опубліковано 15 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій

Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота викладена на 168 сторінках, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 158 сторінок, включно 31 рисунків, 10 таблиць та 4 додатків. Список використаних джерел містить 71 найменування.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Пряно-ароматична сировина як об'єкт сушіння

З давніх часів пряно-ароматичні рослини використовувались для багатьох цілей як лікувальні засоби, приправи, ароматизатори, барвники тощо. Динаміка розвитку світового ринку продуктів рослинного походження демонструє підвищений попит на лікарську та пряно-ароматичну сировину, що є складовим компонентом продукції фармацевтичного, парфюмерно-косметичного, харчового виробництв тощо. Так у харчовій індустрії потреба в цій сировині в світі за останні 10 років збільшилася практично в 6 разів, а обсяги її виробництва зростають щорічно на 20-30% [1,2]. За оцінками експертів, близько 25 % лікарських засобів, що застосовують у медичній практиці в усьому світі, отримують безпосередньо з лікарської рослинної сировини. Зміщення пріоритетів в бік використання лікарських і пряно-ароматичних рослин пов'язано з їхньою високою біологічною активністю, антиоксидантними, бактерицидними властивостями, що актуально в сучасному світі для захисної, антимуtagenної, імуномодельючої дії на організм людини. Таким чином, в умовах сучасності лікарське та ефірно-олійне рослинництво відіграє важливу роль у світовій економіці та фактично стало окремим напрямком підприємницької діяльності. Україна є потужним виробником лікарської та пряно-ароматичної рослинної сировини, яку заготовляють близько 200 тис. тон за рік [1,3].

Однією з широко використовуваних пряно-ароматичних культур є м'ята перцева. Слід зазначити, що світове виробництво м'яти перцевої становило в середньому 105 038 т у 2015-2018 рр., в тому числі у Східній Європі – 176 т [1].

М'ята перцева (*Mentha piperita* L.) є відомою лікарською ефірноолійною культурою, яку широко застосовують завдяки корисним властивостям і терапевтичній дії на організм людини. М'ята перцева є

джерелом одержання аптечного листя та ефірної олії, а також її компонентів, зокрема ментолу, що використовуються у хіміко-фармацевтичній, парфумерно-косметичній, кондитерській, харчовій, лікєро-горілчаній, тютюновій промисловостях та медицині [4, 5].

На рис. 1.1 представлений зовнішній вигляд та м'яти перцевої. Колоїдно-хімічні та структурні властивості листів м'яти перцевої обумовлені особливостями будови і властивостями рослинних клітин і тканин [1-3]. На рис. 1.2 показана структура узагальненої рослинної тканини [6], в якій можна виділити верхню епідерму (1); нижню епідерму (2); продихи (3) з двома округлими навколопродиховими клітинами, суміжні поверхні яких перпендикулярні продиховій щілині (діацитний тип); прості 2-4-клітинні волоски (4) з бородавчастою кутикулою (по жилках і краю листка); дрібні головчасті волоски (5), які складаються з короткої одноклітинної ніжки і одноклітинної оберненояйцеподібної головки; ефіроолійні залози- трихоми (6), що мають коротку ніжку і округлу головку, у складі якої 8, рідше 6 радіально розташованих видільних клітин (не завжди ясно помітних).

Основним активним компонентом м'яти перцевої є ефірна олія, концентрація якої в листках м'яти коливається від 1,2 до 4,8 %, а в суцвіттях досягає 6 % [6]. В стеблах ефірна олія майже відсутня. До складу ефірної олії м'яти перцевої входять ментол (30–55 %), ментон (14-32 %), ізоментон (2-10 %), 1,8–цинеол (6-14 %), α -пінен (1,0-1,5 %), β -пінен (1-2 %), лімонен (1-5 %), неоментол (2,5-3,5 %), ментофуран (1-9 %), ментил ацетат (2,8-10,0 %), пулегон (максимум 4,0 %), карвон (до 1,0 %), ізопулегол (до 0,2 %) [10]. Інші групи біологічно активних речовин м'яти перцевої – флавоноїди (гесперидин, антоціанідини), дубильні речовини (6...12 %), тритерпеноїди (урсолова та олеанолова кислоти), бетаїн, каротиноїди [3]. Також м'ята є багатим джерелом мінералів, таких як Na, Mg, K, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Zn і Se [8, 10].

Листя м'яти здебільшого споживають у свіжому або сушеному вигляді як ароматизатор в різних видах харчових продуктів, в чайних напоях. В медицині м'ята перцева визнана у світі в першу чергу своїми

антимікробними та антиоксидантними властивостями, також широко відомі такі її лікувальні властивості як противірусні, антибактеріальні, протизапальні, протигрибкові, протиастматичні, алопатичні, спазмолітичні, антисептичні тощо. Завдяки комплексу біологічно активних речовин м'ята перцева входить до складу багатьох фармацевтичних препаратів, для виготовлення яких використовують траву, листя та ефірну олію. Так, в Україні сировина м'яти перцевої у ролі інгредієнта чи основного компонента входить до складу 63 лікарських засобів [4, 7].

Свіжозібрана пряно-ароматична сировина містить 85-90 % води, через високий вміст вологи розмножуються мікроорганізми та відбуваються біохімічні реакції, що призводить до погіршення якості, тому безпечно зберігання свіжих рослин протягом тривалого часу неможливе [1]. Важливим етапом в процесі заготівлі лікарських та пряно-ароматичних рослин є сушіння, яке запобігає псуванню сировини та збільшує термін зберігання висушеної трави. Проте під час сушіння при підвищених температурах термочутливі компоненти рослин не зберігаються, що призводить до змінювання аромату, смаку та кольору [1,8].

Основною складовою аромату пряно-ароматичних рослин є ефірні олії – багатокомпонентні суміші летких органічних сполук, які у свіжій траві знаходяться на поверхні листя в ефіроолійних залозах (трихомах) [1,9]. При високій температурі сушіння трихоми можуть розірватися, що призводить до втрати летких сполук через випаровування. Тому збереження цілісності трихоми або мінімізація її пошкодження під час сушіння сприяє утриманню ефірних олій в сушених травах.



Рис. 1.1. М'ята перцева: а – зовнішній вигляд; б – листок.

Леткі ароматичні сполуки є найбільш чутливими компонентами в процесі сушіння пряно-ароматичної сировини, змінювання концентрації яких залежить від способу сушіння, параметрів зневоднення (температури, швидкості повітря), тривалості процесу, а також від вологовмісту, сорту і віку рослини та інших чинників.

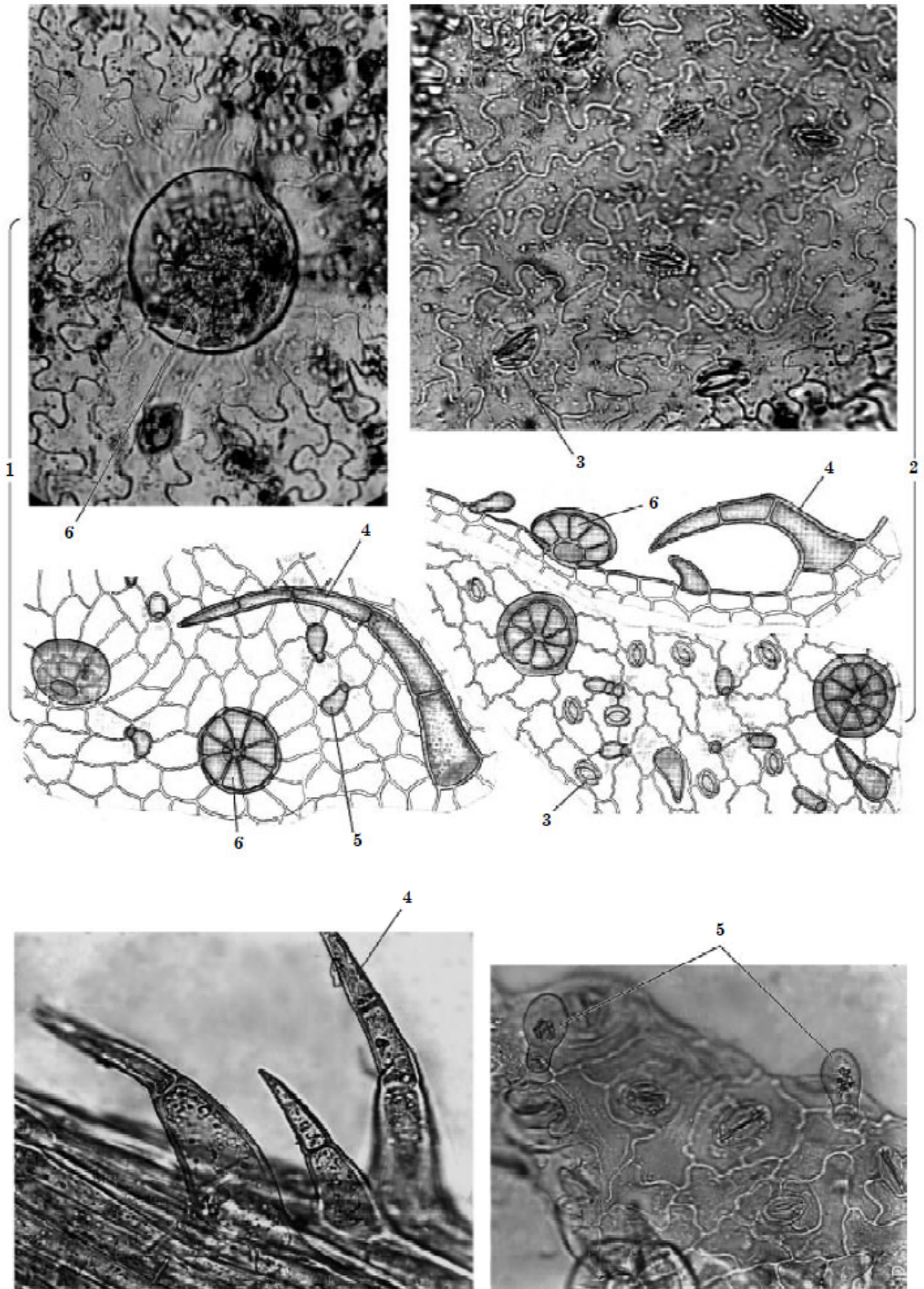


Рис. 1.2. Мікроскопія листка м'яти перцевої.

Найважливішу роль у збереженні летких сполук сушених трав під час сушіння відіграє температура сушильного агента. Застосування зависокої температури сушіння зазвичай призводить до втрати летких сполук, а також до зміни концентрації та складу ефірних олій, що різко погіршує аромат та смак. Для визначення гранично допустимої температури сушіння пряно-ароматичної сировини, яка містить ефірні олії, проаналізовані експериментальні дані щодо впливу температури на вміст ароматичних речовин. Наприклад, дослідження впливу сушіння на вміст ефірної олії в листках меліси [4, 11] показали, що втрати ефірної олії пропорційні температурі сушіння (16%, 23% та 65% при 30, 45 та 60 °С, відповідно), а виражені зміни складу основних компонентів ефірної олії відбуваються при 60 °С. В дослідженні [4,12] показаний вплив різних температур сушіння на кількість та якість ефірних олій м'яти перцевої. Зазначено, що з підвищенням температури сушіння різко знижується вміст ефірної олії (% об./мас.) з 1,0 % при 40 °С до 0,14 % при 60 °С і 0,12 % при 80 °С. Значне зменшення кількості ефірної олії під час сушіння відбувається у багатьох видах трав: на 36–45 % у базиліку, на 23–33 % у майорані та на 6–17 % у материнці [4, 11]. Добре корелюють з вище наведеними даними отримані в ІТТФ НАНУ результати дослідження впливу температури зневоднення на число аромату м'яти і чабера [4,13]. Виявлено, що підвищення температури теплоносія з 40 до 60 °С призводить до втрати аромату сушеної м'яти на 20 %, а чабера – на 29 %. Подальше підвищення температури сушіння на 20 °С призводить до ще більших втрат – 42% і 61%, відповідно. В статі [4,14] наведені результати дослідження впливу температури сушіння і швидкості повітря на вміст ефірних олій в листі м'яти водяної. Експеримент проводився при трьох температурах сушильного агента 40, 50 і 60 °С і його швидкості 1 і 2 м/с. Найвищий вміст ефірної олії (1,33 % об./мас.) спостерігався при температурі 40 °С і швидкості 1 м/с. Збільшення температури і швидкості теплоносія призводило до значних втрат ефірних олій [4, 15].

Таким чином, вибір параметрів процесу сушіння пряно-ароматичних рослин в першу чергу визначається термочутливістю ефірних олій. Для запобігання втрат летких речовин температура сушіння нагрітим повітрям не повинна перевищувати 35-40 °С. Також рекомендується сушити пряно-ароматичні рослини в товстому шарі. Бажано, щоб процес сушіння був затягнутий в часі, це пов'язано з тим, що під час зневоднення в рослинній сировині триває процес біогенезу і накопичення ефірної олії. Проте режими зневоднення для кожного виду рослин необхідно визначати експериментально [4].

Важливим технологічним процесом також є зберігання висушеної пряно-ароматичної сировини. На стійкість сухих пряно-ароматичних трав під час зберігання істотно впливає ступінь зв'язку води з вмістом клітини, що характеризує її активність [16]. Під активністю води a_w розуміють відношення тиску пари води над продуктом p до тиску пари над чистою водою p_o при одній і тій же температурі: $a_w = p/p_o$. Активність характеризує стан води в продукті, причетність до фізичних, хімічних і біохімічних змін і залежить від загального вмісту води, хімічного складу і структури продукту. Чим нижча активність води, тим в меншій мірі вона доступна для мікроорганізмів, тим повільніше протікають біохімічні процеси і вища стійкість продукту під час зберігання. На рис. 1.7 наведена залежність швидкості протікання деяких реакцій розкладання, які впливають на стабільність харчових продуктів, від активності води [16].

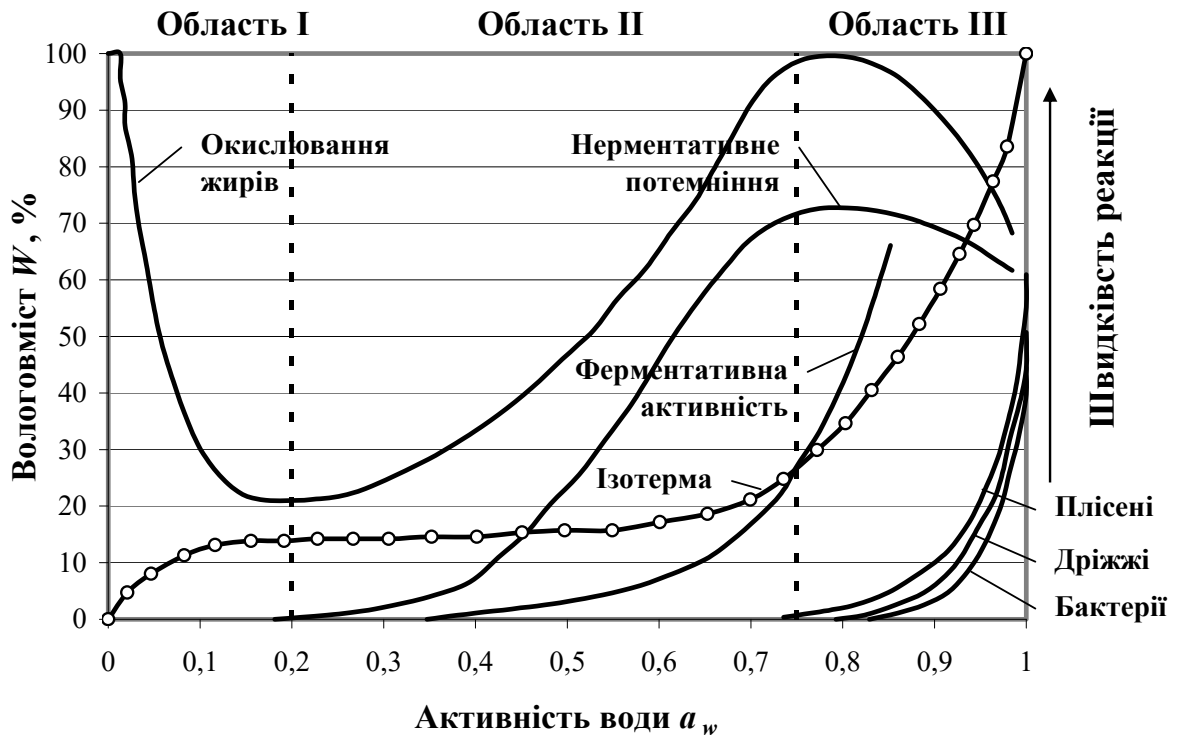


Рис. 1.7. Швидкість протікання біохімічних процесів в харчових продуктах в залежності від активності води.

На графіку виділені три області: 1) у інтервалі a_w від 0 до 0,2 вода міцно зв'язана з твердою матрицею продукту і не може бути розчинником, тобто не може бути доступною для біохімічних реакцій; 2) у інтервалі a_w від 0,2 до 0,75 молекули води доступні для деяких біохімічних реакцій таких як, наприклад, реакції неферментативного потемніння; 3) у інтервалі a_w від 0,75 до 1,0 молекули води слабо зв'язані в розчині і капілярними силами і доступні як для зростання мікроорганізмів, так і для хімічних реакцій.

Очевидно, що чим нижчий залишковий вологовміст висушеного продукту, тим нижча його активність води [16]. При дотриманні відповідних умов зберігання процеси псування таких продуктів не відбуваються.

На закінчення необхідно зазначити, що пряно-ароматичні трави за своєю будовою і хімічним складом є складними системами. З характерних особливостей пряно-ароматичної сировини як об'єкту сушіння в першу чергу необхідно виділити термочутливість летких речовин ефірних олій і високий

початковий вологовміст. У зв'язку з тим, що тривала теплова дія негативно позначається на якості готового продукту, при розробці режимів зневоднення пряно-ароматичної сировини основний акцент повинен робитися на використання низьких температур і скорочення тривалості процесу.

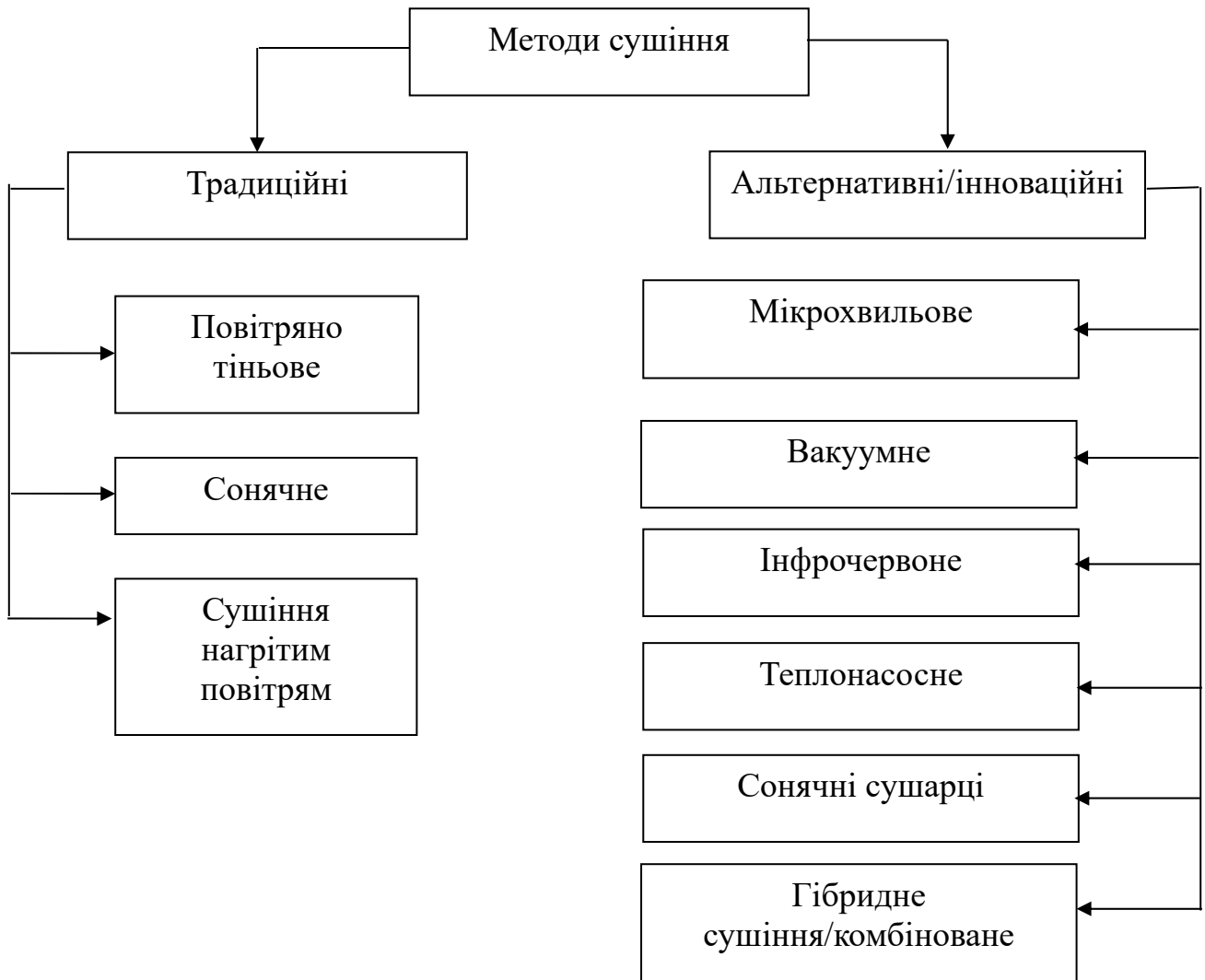
1.2 Аналіз методів зневоднення пряно-ароматичної сировини і сушильного устаткування

В теперішній час для зневоднення матеріалів рослинного походження існує велика кількість різноманітних конструкцій сушильних установок, що відрізняються способом підведення тепла до матеріалу, робочою температурою і тиском в сушильній камері, режимом роботи, станом шару матеріалу під час сушіння тощо. Здійснюючи вибір сушарки для конкретного завдання, необхідно керуватися низкою критеріїв, які можуть значно обмежити вибір сушильного устаткування [17]. Основними критеріями є:

1. Фізична форма висушеного матеріалу і одержуваного продукту.
2. Відповідна якість і задані властивості продукту.
3. Термолабільність матеріалу (спосіб підведення тепла і фізична форма матеріалу повинні вибиратися з урахуванням граничної допустимої температури нагріву матеріалу).
4. Енергетична ефективність.
5. Продуктивність (мала, середня, висока).

Сушіння є основним способом збереження пряно-ароматичної сировини. Гранично допустима температура нагріву пряно-ароматичної сировини не повина перевищувати 50 °С і визначається для кожної культури індивідуально.

Аналіз літературних джерел та інтернет-ресурсів з техніки і технології сушіння показав, що для зневоднення пряно-ароматичної сировини широко використовуються традиційні та альтернативні (інноваційні) методи сушіння [18].



Традиційні методи сушіння пряно-ароматичної сировини використовуються в різних культурах і регіонах світу вже протягом багатьох століть. Вони базуються на використанні природних факторів та традиційних технік для випаровування вологи з сировини. Декілька найпоширеніших традиційних методів сушіння включають [18]:

- Сушіння на повітрі: Цей метод передбачає розкладання пряно-ароматичної сировини на відкритому повітрі, де її сушать за допомогою природного тепла та повітряного потоку. Сировину можуть розкласти на плоских поверхнях, наприклад, на сушильних решітках або матках. Час сушіння залежить від

кліматичних умов і може тривати від кількох днів до кількох тижнів. Цей метод використовується зокрема для сушіння трав, листя, квітів та інших рослин;

- Сушіння на сонці: Цей метод є варіацією сушіння на повітрі, але з використанням прямої сонячної енергії. Сировину розкладають на відкритому повітрі під прямим сонячним промінням, що допомагає швидше випаровувати вологу. Сушіння на сонці часто застосовується в сухих та сонячних регіонах, де сонячна енергія легко доступна;

Повітряно-тіньове сушіння є найпоширенішим способом зневоднення трав, під час якого сировину, що містить ефірні олії, розкладають шаром 7-10 см в чистих провітрюваних приміщеннях, або в тіні під навісами. Поряд з природними способами сушіння, широко використовується сушіння нагрітим повітрям в конвективних сушильних установках. Проте це вимагає великих витрат електричної або теплової енергії [4, 15]. Під час низькотемпературного сушіння умови протікання процесу зневоднення суттєво залежать від тепловологісних параметрів зовнішнього повітря, що в нестабільних кліматичних умовах України не дозволяє дотримуватися заданих режимів, і, як наслідок, не вдається досягти необхідних якісних показників продукту. Таким чином, дослідження, спрямовані на зниження енерговитрат та створення контрольованих умов сушіння лікарських та пряно-ароматичних рослин є актуальними .

Для забезпечення постійних, приближених до ідеальних умов сушіння, що не залежать від погодних умов, використовуємо сушарку конвективного типу.

Важливим завданням дослідження є удосконалення технології підготовки сировини до сушіння, застосування більш досконалих типів сушарок і оптимальних режимів зневоднення створили умови для найбільш ефективної сушки пряно-ароматичного сировини.

Традиційні методи сушіння є простими та доступними, але вони можуть бути залежними від погодних умов та потребують більш тривалого часу порівняно з сучасними технологіями сушіння. Однак, в деяких випадках вони дозволяють зберегти особливий аромат і смак пряно-ароматичної сировини, що робить їх популярними у традиційних кулінарних та фармацевтичних практиках [19].

Сушіння нагрітим повітрям - це процес видалення вологи з матеріалу, застосовуючи гаряче повітря. Цей метод широко використовується у промисловості та побуті для сушіння продуктів, будівельних матеріалів, текстилю та інших матеріалів.

Принцип сушіння нагрітим повітрям полягає в тому, що гаряче повітря, яке має нижчу відносну вологість, витягує вологу з матеріалу, забезпечуючи випаровування вологи. Це досягається за допомогою спеціальних пристроїв, таких як сушарки або тунельні сушарки.

Основні переваги сушіння нагрітим повітрям включають швидкість процесу, ефективність видалення вологи та можливість контролювати температуру і вологість повітря для досягнення оптимальних умов сушіння. Крім того, цей метод зазвичай більш енергоефективний, ніж інші способи сушіння, оскільки використовується тепло, яке вже створюється для нагріву повітря.

Однак сушіння нагрітим повітрям може мати й деякі недоліки. Наприклад, висока температура може вплинути на якість деяких матеріалів, особливо тих, які вразливі до тепла. Також, в деяких випадках, видалення вологи з матеріалу нагрітим повітрям може впливати на його структуру або властивості.

Окрім традиційних методів сушіння, існує також кілька альтернативних методів, які використовуються для сушіння пряно-ароматичної сировини. Деякі з цих методів використовуються в промисловості, де вони забезпечують швидше та ефективніше сушіння з

мінімальним впливом на якість продукту. Деякі альтернативні методи сушіння [20-22]:

Мікрохвильове сушіння [23] є одним з альтернативних методів сушіння, який використовує мікрохвильове випромінювання для випаровування вологи з пряно-ароматичної сировини. Цей метод базується на використанні електромагнітних хвиль з довжиною хвилі приблизно 1-30 см, які можуть проникати вглиб сировини і нагрівати її.

Процес мікрохвильового сушіння полягає у розміщенні сировини у спеціальній камері, яка генерує мікрохвильове випромінювання. Мікрохвилі проникають внутрішні шари сировини, взаємодіють з молекулами води і сприяють їх нагріванню. Це призводить до випаровування вологи з сировини, яка потім може бути відведена з камери сушіння.

Основні переваги мікрохвильового сушіння включають [23]:

1. Швидкість сушіння: Мікрохвильові хвилі можуть швидко проникати всередину сировини і нагрівати її, що призводить до швидкого випаровування вологи. Це дозволяє скоротити час сушіння порівняно з іншими методами.

2. Енергоефективність: Мікрохвильові сушарки зазвичай мають високу енергоефективність, оскільки вони спрямовують енергію безпосередньо на сировину, не витрачаючи зайву енергію на нагрівання повітря.

3. Збереження якості: Мікрохвильове сушіння відбувається при низьких температурах, що допомагає зберегти природний аромат, смак і хімічні властивості сировини. однак, мікрохвильове сушіння також має деякі обмеження. Нерівномірний нагрів сировини, можливість перегріву або недостатньої сушіння деяких ділянок сировини - це деякі з факторів, які можуть вплинути на якість та однорідність сушіння.

Дослідження та оптимізація параметрів процесу, таких як потужність мікрохвильового випромінювання, час сушіння і температура, можуть бути необхідними для досягнення оптимальних результатів сушіння пряно-ароматичної сировини методом мікрохвильового сушіння [23].

Вакуумне сушіння є ще одним альтернативним методом сушіння пряно-ароматичної сировини. Воно базується на засаді випаровування вологи з сировини шляхом зниження атмосферного тиску в околі сировини.

Процес вакуумного сушіння включає розміщення сировини у спеціальній камері, яка може створювати вакуумний середовище. Зниження тиску в камері зменшує точку кипіння води, що сприяє швидкому випаровуванню вологи з сировини при нижчих температурах.

Основні переваги вакуумного сушіння включають [23].:

1. Збереження якості: Зниження тиску у камері допомагає зменшити температуру, при якій відбувається сушіння. Це дозволяє зберегти природні аромати, смаки і хімічні властивості сировини, оскільки менше тепла та менша окислювальна реакція відбуваються під час процесу.

2. Швидкість сушіння: Знижений тиск вакуумного середовища сприяє швидшому випаровуванню вологи, оскільки точка кипіння води знижується. Це може допомогти скоротити час сушіння порівняно з іншими методами.

3. Ефективне видалення вологи: Вакуумне середовище створює ідеальні умови для випаровування вологи з сировини. Тиск усуває перешкоди для дифузії води і сприяє ефективному видаленню вологи з сировини.

Вакуумне сушіння також має свої обмеження [23]. Воно може вимагати спеціального обладнання та високих енергетичних затрат для створення та підтримки вакуумного середовища. Крім того, вразливість сировини до окислення та змін хімічного складу може бути важливим фактором, який потребує уваги під час процесу вакуумного сушіння.

Для досягнення оптимальних результатів вакуумного сушіння необхідно належним чином контролювати тиск, температуру і час сушіння, а також враховувати характеристики та вимоги конкретної пряно-ароматичної сировини.

Інфрачервоне сушіння є одним з альтернативних методів сушіння пряно-ароматичної сировини, яке використовує інфрачервоне

випромінювання для передачі тепла безпосередньо на поверхню сировини. Інфрачервоне випромінювання є електромагнітним випромінюванням з довжиною хвилі близько 0,75 до 1000 мікрометрів, що лежить в діапазоні між видимим світлом та радіочастотами.

Процес інфрачервоного сушіння полягає у використанні інфрачервоних обігрівачів або ламп, які випромінюють тепло в напрямку сировини. Це тепло абсорбується сировиною, що призводить до випаровування вологи. Особливість інфрачервоного випромінювання полягає в тому, що воно може нагрівати поверхні сировини без необхідності нагрівання навколишнього повітря.

Основні переваги інфрачервоного сушіння включають [24]:

1. Швидкість сушіння: Інфрачервоне випромінювання нагріває поверхні сировини безпосередньо, що сприяє швидкому випаровуванню вологи. Це дозволяє скоротити час сушіння порівняно з іншими методами.

2. Енергоефективність: Інфрачервоні лампи передають тепло безпосередньо на поверхню сировини, що дозволяє ефективно використовувати енергію. Вони не витрачають зайву енергію на нагрівання повітря, що забезпечує економію електроенергії.

3. Контроль температури: Інфрачервоне сушіння дозволяє легко контролювати температуру нагріву сировини шляхом регулювання інтенсивності випромінювання. Це важливо для забезпечення оптимальних умов сушіння і збереження якості сировини.

Однак, важливо враховувати, що інфрачервоне сушіння зазвичай працює на поверхні сировини, тому нерівномірне розподілення вологи впливає на однорідність процесу. Крім того, залежно від характеристик сировини, можуть виникати виклики з регулюванням теплового профілю для досягнення оптимального сушіння.

Дослідження і встановлення оптимальних параметрів, таких як інтенсивність випромінювання, відстань до джерела тепла та час сушіння, є

важливими аспектами для успішного використання інфрачервоного сушіння для пряно-ароматичної сировини.

Сушіння в сонячній сушарці [25] є ще одним альтернативним методом, який використовує енергію сонця для випаровування вологи з пряно-ароматичної сировини. Цей метод використовує природну сонячну радіацію, яка постачає тепло для процесу сушіння.

Сонячні сушарки зазвичай складаються з чорної або темної площини, яка поглинає сонячну енергію і перетворює її на тепло. Над цією площиною розміщується решітчаста або перфорована підставка, на яку кладуть пряно-ароматичну сировину. Сонячні промені проникають крізь решітку і нагрівають сировину, сприяючи випаровуванню вологи.

Основні переваги сушіння в сонячній сушарці включають [25]:

1. Екологічність: Використання сонячної енергії не вимагає спалювання палива або використання електроенергії, що допомагає знизити викиди в атмосферу та негативний вплив на довкілля.

2. Економічність: Сонячна енергія є безкоштовним джерелом енергії, тому використання сонячних сушарок може знизити витрати на енергію та знизити загальні витрати сушіння.

3. Збереження аромату та якості: Сонячна сушіння може допомогти зберегти природний аромат та смак пряно-ароматичної сировини, оскільки вона відбувається при низьких температурах, що зменшує ризик втрати важливих хімічних сполук.

Однак, сушіння в сонячній сушарці також має свої обмеження. Недостатня сонячна активність, небезпека забруднення сировини, обмежена продуктивність в поганих погодних умовах - це деякі з факторів, які можуть вплинути на ефективність процесу.

Загалом, сушіння в сонячній сушарці є екологічним, економічним та природним методом зневоднення пряно-ароматичної сировини, який може бути ефективним в регіонах з високим рівнем сонячної активності та при правильному проектуванні та використанні сонячних сушарок.

Комбіноване сушіння є методом [26], який поєднує в собі два або більше різних методи сушіння з метою підвищення ефективності процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини. Цей підхід дозволяє використовувати переваги кожного окремого методу, щоб отримати оптимальний результат.

Наприклад, комбіноване сушіння може включати поєднання теплового сушіння з використанням сонячних сушарок. Сировину спочатку можна піддати сонячному сушінню для переднього випаровування вологи, а потім додатково обробляти її в тепловій сушарці, щоб завершити процес сушіння. Це дозволяє скоротити час сушіння і забезпечити більшу ефективність за рахунок комбінації двох джерел енергії.

Інші комбінації можуть включати поєднання теплового сушіння з вакуумним сушінням [27], мікрохвильовим сушінням або сушінням у вібраційному полі. Кожен комбінований метод може бути налаштований і оптимізований для конкретних вимог і характеристик пряно-ароматичної сировини.

Комбіноване сушіння може мати декілька переваг. Воно може дозволити ефективніше використовувати енергію, скоротити час сушіння, підвищити якість та зберегти ароматичні сполуки сировини. Однак, цей підхід також може вимагати більш складної обладнання, контролю та налаштування процесу сушіння.

Теплонасосне сушіння є інноваційним методом сушіння пряно-ароматичної сировини, який використовує принцип теплового насоса для видалення вологи з матеріалу. Воно базується на перенесенні тепла з низькотемпературного середовища високотемпературне середовище за допомогою теплового насоса [20, 28].

Процес теплонасосного сушіння включає використання компресора, теплообмінника і робочого середовища, яке циркулює в системі. Починаючи з низькотемпературного середовища, теплообмінник поглинає тепло з сировини і переносить його в робоче середовище за допомогою компресора.

Потім робоче середовище підвищує температуру і віддає тепло до оточуючого середовища або використовується для інших цілей. Цей цикл повторюється для постійного видалення вологи з сировини.

Основні переваги теплонасосного сушіння включають [21, 29]:

1. Енергоефективність: Теплонасосне сушіння використовує низькотемпературне середовище для відбору тепла з сировини, що дозволяє зменшити енергетичні затрати порівняно з іншими методами сушіння.

2. Збереження якості: Низькі температури процесу теплонасосного сушіння допомагають зберегти аромати, смаки і хімічні властивості пряно-ароматичної сировини, оскільки менше тепла і менша окислювальна реакція відбуваються під час сушіння.

3. Контроль вологості: Теплонасосне сушіння дозволяє ефективно контролювати рівень вологості у процесі сушіння. Регулювання температури і інтенсивності сушіння може бути здійснено, щоб досягти оптимального рівня вологості для сировини.

4. Екологічність: Теплонасосне сушіння використовує менше енергії і може бути підключене до екологічно чистих джерел енергії, таких як відновлювані джерела або сонячні панелі, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

Враховуючи переваги теплонасосного сушіння, воно є привабливою альтернативою для ефективного та якісного сушіння пряно-ароматичної сировини [30, 31]. Проте, важливо враховувати параметри, такі як температура, час сушіння та режими контролю, щоб забезпечити оптимальні умови для кожного типу сировини.

Вибір конкретного комбінованого методу сушіння залежить від характеристик сировини, доступності ресурсів та економічних факторів. Дослідження та експерименти можуть бути необхідними для визначення оптимального комбінованого методу сушіння для конкретної сировини та умов.

На цей час опублікована значна кількість науково-технічних праць, теоретичних і експериментальних, основною метою яких було всебічне дослідження питань енергозбереження в сушильних установках. Серед них необхідно виділити роботи Долінський А.А. [32], Снєжкін Ю.Ф. [33], Бурдо О.Г. [34], Петрова Ж.О. [35], Погожих М.І. [36], Атаманюк Б. М. [37], Дубковецький І.В. [38], в яких висвітлена актуальність робіт.

1.3 Аналіз схем включення теплових насосів до сушильних установок

1.3.1 Компактні (моноблочні) та роздільні (спліт) теплонасосні сушильні системи

Теплові насоси, що поєднані з сушильними камерами, можуть бути виконані у вигляді компактних (моноблочних) або роздільних (спліт) систем [39]. У компактних системах теплонасосного сушіння випарник і конденсатор встановлені в одній шафі 3, що розташована за межами сушильної камери 1 (рис. 5, а). У цьому випадку, тепле вологе повітря, що йде з сушильної камери, (точка i) розділяється на два потоки (рис. 1.5, б). Один потік направляється до випарника EV, де спочатку частково охолоджується (процес $i-a$), а потім зневоднюється (процес $a-b$). Зкраплена на зовнішній поверхні випарника волога стікає до конденсатозбірника і вилучається з сушарки. Інша частина повітря в стані i направляється в обхід випарника і змішується з потоком осушеного повітря. Змішане повітря (точка m) нагрівається при постійній вологості в конденсаторі CD (процес $m-c$) до температури T_c , що вища за температуру оточуючого повітря за сухим термометром T_i . Далі нагріте сухе повітря надходить до сушарки, де проходить через шар матеріалу, нагріває його і відбирає видалену з нього вологу (ізоентальпійний процес зневоднення $c-i$).

У роздільних (спліт) системах теплонасосного сушіння (рис. 1.6, а) є дві термічно ізольовані одна від одної камери: сушильна камера 1 з виносним

конденсатором CD і агрегатний відсік 3 з компресором С, випарником EV, вентилятором, повітроводами і системою регулювання. Всі чутливі до температури компоненти, таким чином, термічно ізолювані від області сушіння. Вологе повітря, що йде з сушильної камери охолоджується і зневоднюється у випарнику EV теплового насоса 2 (процес $i-a-b$), потім надходить до сушильної камери, де змішується з внутрішнім повітрям в стані i (рис. 1.6, б). Здатність теплового насоса осушувати повітря регулюється зміною швидкості обертання вентилятора випарника, зневоднене повітря змішується з повітрям сушильної камери до входу в конденсатор CD. Змішане повітря в стані m нагрівається конденсатором CD і за необхідності додатковим нагрівачем.

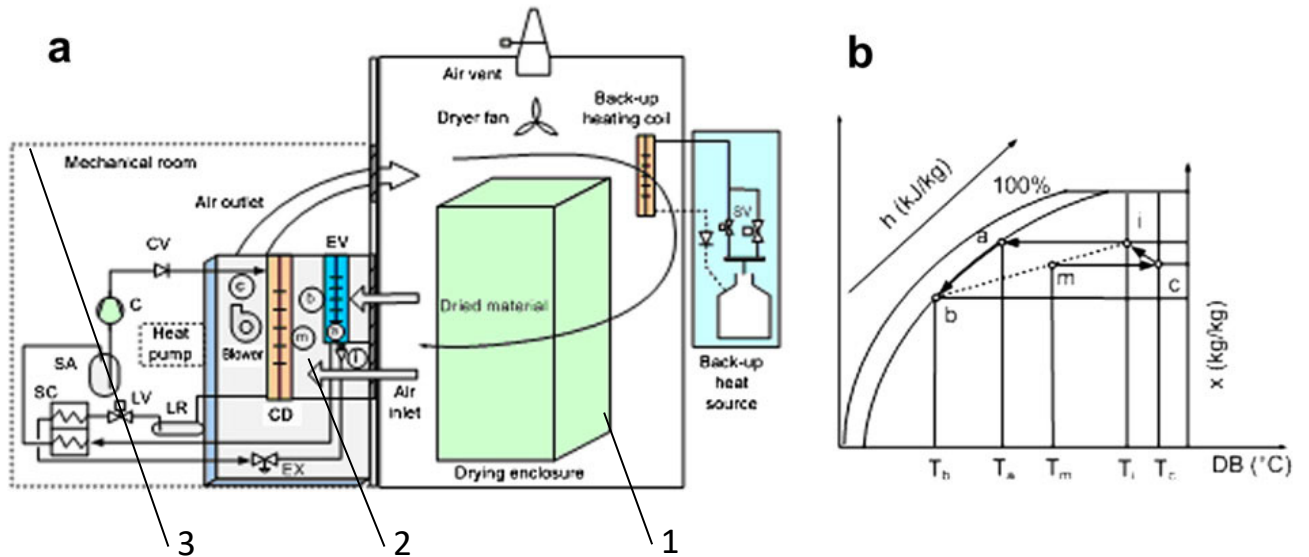


Рисунок 1.5. Схематичне зображення сушарки з компактною теплонасосною системою (а); процес сушіння, представлений у діаграмі Мольтє (б).

1 – сушильна камера; 2 – теплонасосний агрегат; 3 – агрегатний відсік;
 EV – випарник; CD – конденсатор; С – компресор; CV – зворотний клапан;
 SA – збірник холодоагенту (ресивер); SC – переохолоджувач;
 EX – регулюючий клапан (дросель); LR – ресивер; LV –клапан

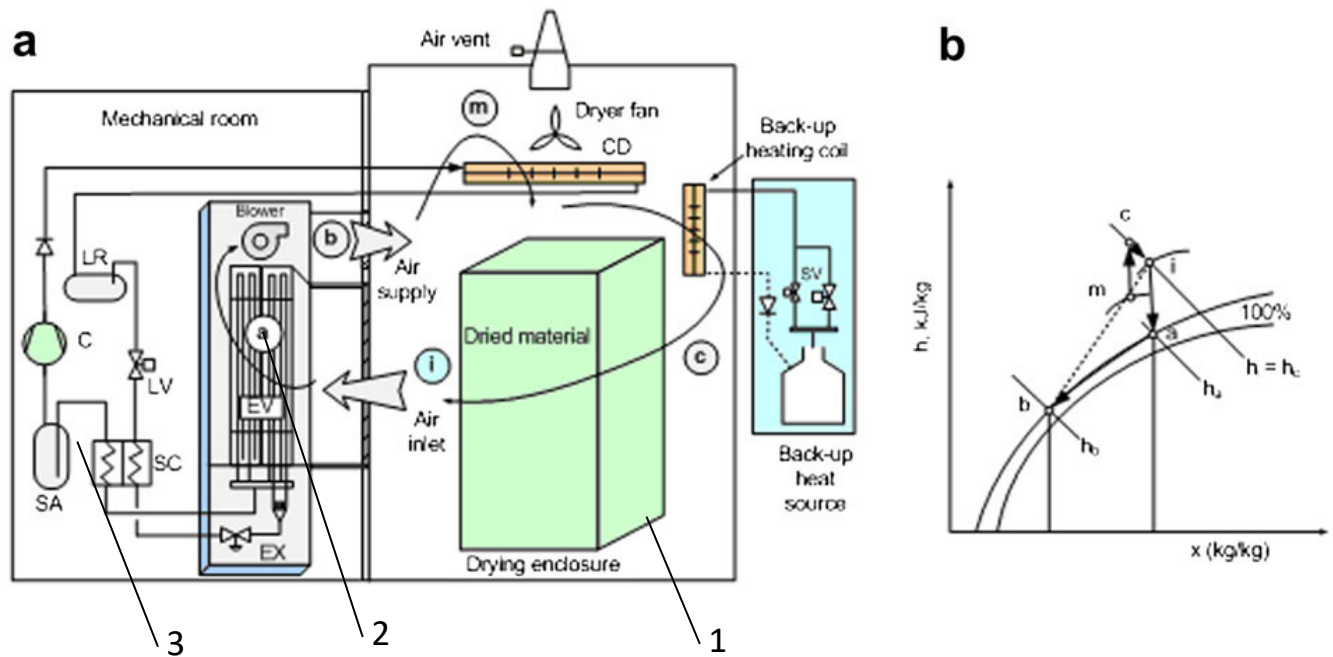


Рисунок 1.6. Схематичне зображення сушарки з роздільною (спліт) системою (а); процес сушіння, представлений у діаграмі Мольтє (б).

Як вже зазначалося раніше, в обох системах з тепловим насосом – компактних і роздільних – ступінь зневоднення повітря може ефективно регулюватися, але по-різному. У сушарках з компактною теплонасосною системою зневоднене повітря змішується з повітрям, яке обходить випарник, в той час як в роздільних системах, здатність теплового насосу зневоднювати повітря регулюється зміною швидкості обертання вентилятора випарника.

1.3.2. Сушильні теплонасосні системи періодичної та безперервної дії

Теплонасосні агрегати можуть бути інтегровані в сушарки як періодичної дії (рис. 1.7, а) так і безперервної дії (рис. 1.7, б) [39]. Теплові насоси більше підходять для періодичної експлуатації, так як системи періодичної дії дозволяють повітря бути перерозподіленим з дуже низьким коефіцієнтом витоків. Проте, теплове навантаження сушарки періодичної дії зменшується, так як матеріал висихає в процесі сушіння, в результаті чого вологість повітря зменшується з часом, що впливає на теплонасосний

термодинамічний цикл і продуктивність. Конвеєрні (безперервної дії) сушильні системи показали обнадійливі результати, і потенційно можуть бути ефективним варіантом для рослинних матеріалів. Тим не менше, кілька досліджень були проведені на сушарки безперервної дії з теплового насосу в порівнянні з сушарками періодичної дії з тепловим насосом. Кудра і Муджумбар [14] розглянули (конвеєр) раніше застосований Стромменом і Крамером для продуктів чутливих до нагрівання. Цзя і ін. [14] розробили модель для безперервної роботи сушарки з тепловим насосом, який передбачив стан повітря в системі, швидкість передачі тепла в випарник, конденсатор і системи зовнішнього відходу, COP і максимальну ефективність можна досягти. Ця модель була використана Клементсом і співавт. для дослідження продуктивності сушарки безперервної дії з присутністю теплового насосу. Останні використовували мокрий поролон в сушарці киплячого шару безперервної дії. Вони показали, що питома вологість екстракційної швидкості (SMER) сушарки подвоїлася від 1,25 до 2,5 кг.кВт.г, коли відносна вологість повітря на вході сушарки збільшена з 32% до 80%.

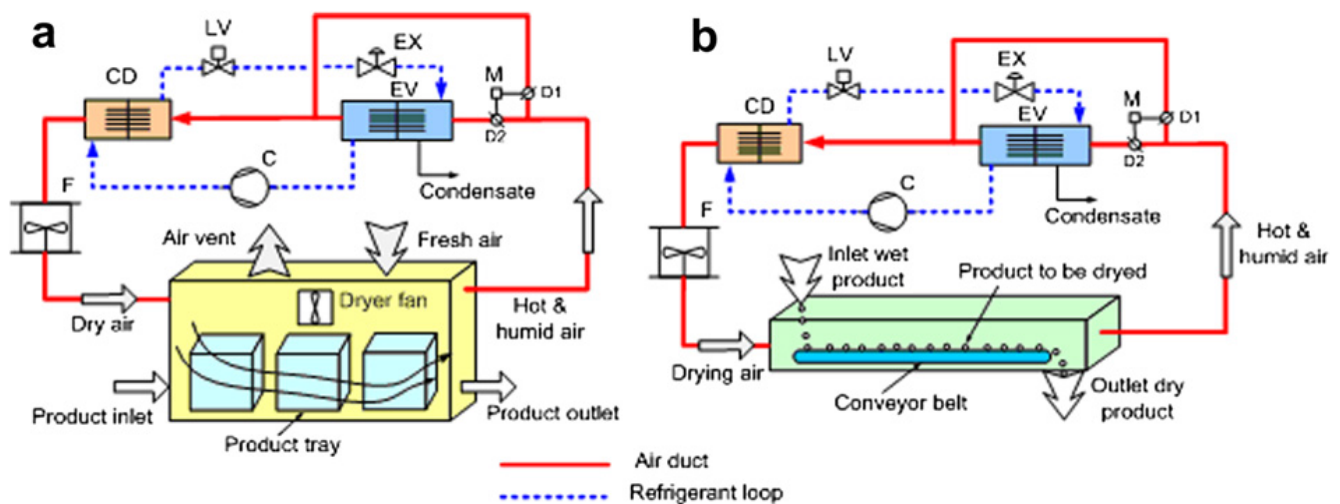


Рисунок 1.7. Теплонасосна сушарка періодичної дії (а);
конвеєрна сушарка з тепловим насосом (б).

EV – випарник; CD – конденсатор; C – компресор; CV – зворотний клапан; SA – збірник холодоагенту (ресивер); SC – переохолоджувач;

EX – регулюючий клапан (дросель); LR – ресивер; LV – клапан;

F – вентилятор

1.4 Висновок до розділу 1

З вищенаведеного літературного огляду випливає, що для переробки пряно-ароматичної сировини з точки зору низьких приведених витрат перевагу має технологія одержання сухого продукту з використанням конвеєрних або тунельних сушарок. Проте під час конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту виникає ряд проблем, які потребують вирішення. Це низька інтенсивність процесу вологовидалення при використанні невисоких температур, а також залежність ефективності роботи сушарки від вологості атмосферного повітря та значні втрати теплоти з відпрацьованим повітрям. Теоретичні передумови дозволяють припустити, що використання теплового насоса дозволить за рахунок примусового осушення повітря створювати керовані умови процесу зневоднення, інтенсифікувати вологовидалення, утилізувати приховану теплоту пароутворення вологи, яка йде з відпрацьованим повітрям, що дасть можливість одержувати продукт високої якості з меншими часовими і енергетичними витратами.

На основі аналізу проблеми сформульовані завдання даного дослідження:

- аналіз літературних джерел щодо впливу температури сушіння на вміст ефірних олій у висушених пряно-ароматичних травах, визначення гранично допустимої температури нагріву м'яти перцевої;
- дослідження сорбційних властивостей м'яти перцевої, визначення чистої ізостеричної теплоти адсорбції;
- визначення теплоти випаровування в процесі теплового сушіння м'яти перцевої;
- дослідження залежності кінетики процесу сушіння м'яти перцевої, від тепловологісних параметрів сушильного агента;

- вибір та обґрунтування методу інтенсифікації процесу низькотемпературного сушіння м'яти перцевої;
- розроблена енергоефективних режимів зневоднення м'яти перцевої та вибір способу сушіння;
- аналітичні дослідження процесу теплонасосного сушіння, визначення енергетичних показників;
- розроблення конструктивної схеми теплонасосного агрегату;
- дослідження рекуперативного полімерного теплообмінника.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ УСТАНОВКИ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика дослідження адсорбційних властивостей матеріалів

Визначення адсорбційних властивостей пряно-ароматичних матеріалів тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена

Для створення в замкнутому просторі ексікаторів повітряного середовища із заданою вологістю використовувалися розчини сірчаної кислоти різної концентрації.

Оскільки в довідковій літературі [40] наведена залежність тиску водяної пари над розчинами сірчаної кислоти в мм рт.ст. від концентрації H_2SO_4 у вагових %, був проведений перерахунок даного тиску на відносну вологість φ за формулою:

$$\varphi = \frac{p}{p_s}, \quad (2.1)$$

де p – парціальний тиск водяної пари при атмосферному тиску 760 мм рт.ст. і температурах, що охоплюють можливий діапазон їх зміни в експерименті;

p_s – тиск насичення при атмосферному тиску і відповідній температурі.

Для розбавлення сірчаної кислоти були використані дані хімічних довідників [40, 41]. У довідниках в табличній формі наведена залежність тиску водяної пари над розчинами від вагових % H_2SO_4 в розчині (тобто від її концентрації), а також залежність вмісту H_2SO_4 в грамах на 100 г розчину і на 1 літр розчину від густини розчину в г/см³ при 20 °С для кислоти густиною 1,8305.

Визначення рівноважних вологостей порошків проходилося в діапазоні відносних вологостей повітря φ від 0,4 до 0,9, які характерні для виробничих умов. За заданими відносним вологостями φ за формулою перерахунку (2.4)

і довідковим даними була визначена необхідна концентрація сірчаної кислоти (табл. 2.1). Слідуючи техніці приготування розчинів [40], в результаті інтерполяції даних табл. 2.1 було підготовлено шість розчинів для шести різних відносних вологостей φ в діапазоні від 0,4 до 0,9. Розчини були залиті в ексикатори із зазначенням ρ і φ на ексикаторах і кришках.

У заздалегідь підготовлені бюкси завантажувалися навішення матеріалу масою 1 г. Для зменшення випадкових помилок експерименти проводилися з трьома паралельними зразками. Бюкси з навішеннями висушувалися до постійної ваги в шафі сушильної електричній СНОЛ 3,5.3,5 3,5/3,5I2 при температурі 60 °С протягом 4 годин. Після висушування бюкси з навішеннями зважувалися. Бюкси з відкритими кришками поміщалися в ексикатори згідно протоколу експерименту. Кришки ексикаторів щільно закривалися. Зразки витримували в ексикаторах протягом трьох тижнів до встановлення рівноваги з навколишнім середовищем.

Зважування бюкс з навішеннями проводилися на лабораторних вагах ВЛР-200 г з припустимою похибкою зважування 0,5 мг. Перед експериментом всі ваги в лабораторії були відрегульовані і повірені. У експерименті фіксували також температуру і тиск навколишнього повітря і час. Результати вимірювань заносилися в лабораторний журнал. Приріст маси зразків на початку експерименту визначали щодня. Зважування зразків проводили аж до досягнення ними постійної маси в трьох послідовних вимірах протягом трьох наступних днів. Експерименти проводилися при температурі навколишнього повітря, яка коливалася в інтервалі 20-21 °С.

Оскільки величина абсолютно сухої маси матеріалу в процесах сорбції-десорбції і сушіння-зволоження залишається незмінною, тому при обробці всіх експериментальних даних поглинена матеріалом волога була віднесена до маси абсолютно сухого навішення, тобто визначався вологовміст.

Таблиця 2.1.

Властивості водних розчинів сірчаної кислоти

H_2SO_4 вагові %	ρ (при 20 °С), мм рт. ст.	φ (при 20 °С)	Густина р-ну H_2SO_4 (при 20 °С), г/см ³	Концен трація р-ну H_2SO_4 (при 20 °С), г/л
10	17,2	0,981	1,066	106,6
20	15,4	0,878	1,139	227,9
25	14,5	0,827	1,178	294,6
30	13,2	0,753	1,219	365,6
35	11,6	0,662	1,260	441,0
40	9,8	0,559	1,303	521,1
45	8,0	0,456	1,348	606,4
50	6,2	0,354	1,395	697,5

Вологовміст матеріалу визначався як

$$W = \frac{m_i - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

де W – вологовміст матеріалу в %;

m_i – маса бюкси з вологим матеріалом (поточне значення), г;

$m_{\text{сух}}$ – маса бюкси з сухим матеріалом, г;

$m_{\text{бюк}}$ – маса бюкси, г.

Рівноважний вологовміст матеріалу визначався як

$$W_P = \frac{m_p - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

де m_p – маса бюкси з вологим матеріалом в рівноважному стані, г.

Таким чином, були одержані ізотерми сорбції $W_p = f(\varphi)$ у дослідженому інтервалі відносних вологостей повітря. У експерименті фіксувалася зміна вологості зразків у часі, що дозволило одержати кінетичні криві сорбції $W = f(\tau)$.

2.2 Експериментальна установка і методика проведення досліджень теплофізичних характеристик за допомогою установки синхронного теплового аналізу

Інформація щодо поточних витрат теплоти на випаровування води з рослинної сировини, необхідна для теплових розрахунків процесу сушіння. Спеціально для вимірювання теплоти випаровування під час сушіння в ІТТФ НАН України було створено прилад синхронного теплового аналізу – диференціальний мікрокалориметр випаровування „ДМКИ-01” [1]. Зовнішній вигляд мікрокалориметра випаровування зображено на рис. 2.1.

Він складається з диференціального мікрокалориметра випаровування „ДМКИ-01”, який вміщує: тепловий блок (1), цифрові аналітичні ваги „AD-500” (3) та блок електронного регулювання (4); систему подачі повітря, оснащену витратоміром та датчиком відносної вологості; автоматизовану систему збору та обробки інформації, оснащену спеціально розробленим програмним забезпеченням.

Тепловий блок 1 зібрано за схемою диференціального вимірювання теплових потоків [1]. Він складається (рис. 2.2) з калориметричної платформи (2), розташованої всередині робочої камери (10), яка утворена з верхнього (8) та нижнього (9) кожухів. Кожухи мають термостатування та оснащені незалежними системами нагрівання та підтримування ізотермічного режиму сушіння.

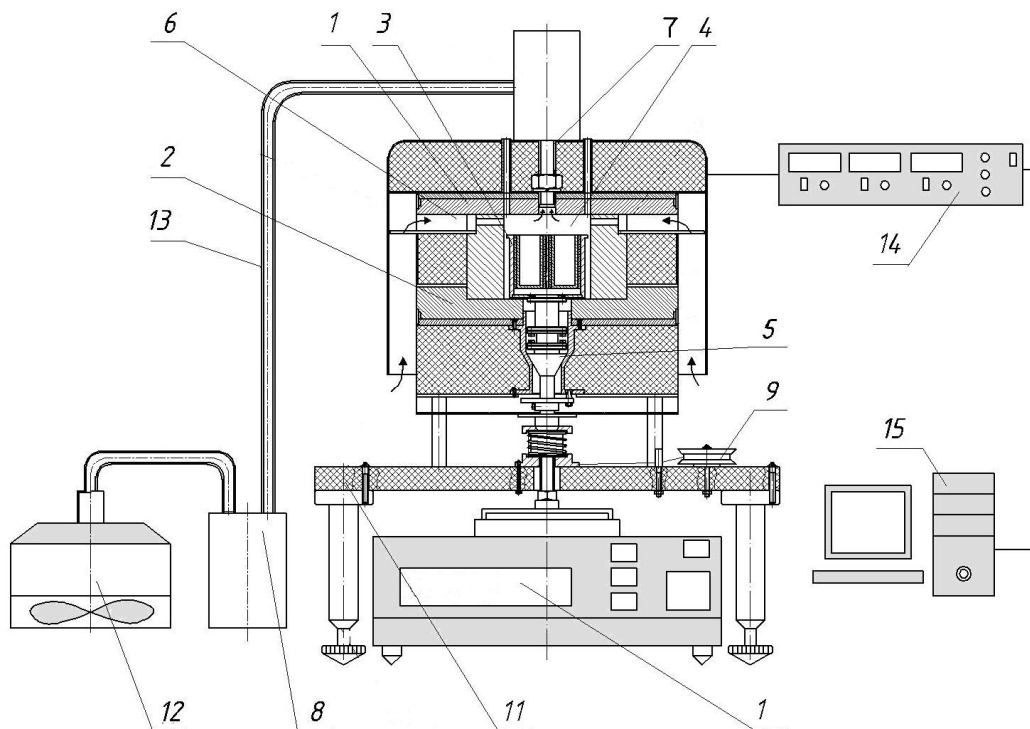


Рис.2.1. Принципова схема установки ДМКИ-01.

1,2 – верхній і нижній термостатовані кожухи теплового блока; 3 – калориметрична платформа з глибокими комірками; 4 – робоча камера; 5 – коаксіальна стойка; 6 – радіальні канавки для току повітря; 7 – фланець з трубкою для відведення вологого повітря; 8 – сепаратор; 9 – аретир; 10 – аналітичні терези; 11 – стіл з опорами, які регулюються; 12 – пневмонасос; 13 – гнучка трубка; 14 – електронний блок; 15 – ПК з програмним забезпеченням.

Базова конструкція установки ДМКИ-01 передбачає монтаж всередині теплового блока калориметричної платформи з комірками у вигляді плоских чашок з висотою бортика 5 мм і з плоскими перетворювачами теплового потоку (ПТП), змонтованими під їх денцем. Однак така конструкція комірок не дозволяє проводити дослідження з крупнодисперсними сипкими матеріалами через високий термічний опір таких

об'єктів. Для вирішення цієї проблеми було спроектовано та створено додаткову калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм і розташуванням ПТП вздовж периметру стінок комірок (рис. 2.2). Обидві калориметричні платформи є змінними блоками в наявній конструкції калориметра. Оскільки вимір величини теплових потоків, які виникають під час досліду, провадиться методом диференціальної теплотиметрії, зразок розташовують в робочій комірці, а друга комірka є коміркою порівняння.

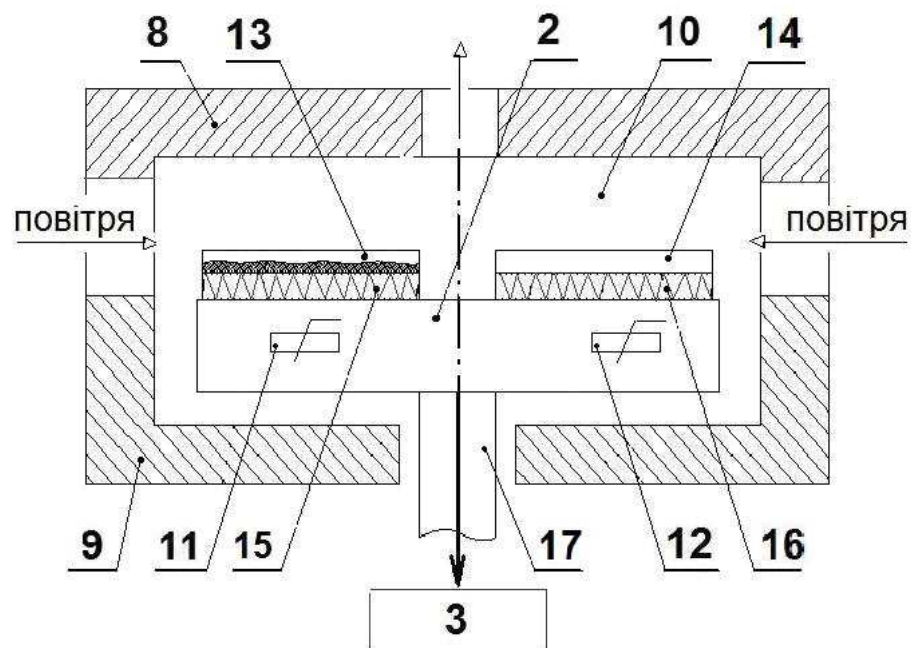


Рис. 2.2. Принципова схема теплового блоку „ДМКИ-01”:

2 – калориметрична платформа; 3 – аналітичні ваги; 8, 9 – верхній та нижній термостатовані кожухи; 10 – робоча камера; 11, 12 – терморезистори; 13 – комірka з досліджуваною речовиною; 14 – комірka порівняння; 15, 16 – перетворювачі теплового потоку; 17 – коаксіальна стійка

Для визначення питомої теплоти випаровування вологи, яка залежить від температури сушки і вологості матеріалу, в ДМКИ-01 застосовується метод синхронного теплового аналізу. Метод засновано на одночасному вимірі кількості теплоти, яку витрачено на випаровування вологи з

матеріалу в процесі ізотермічної сушки, і відповідного зменшення маси зразка. Поточні значення теплоти випаровування вологи з матеріалу в момент сушки τ_i визначаються за формулою:

$$r_i = \frac{\int_{\tau_{i-1}}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau}{m_{i-1} - m_{i+1}}, \quad (2.4)$$

Для визначення поточних значень теплоти випаровування води з деревовидних тканин однорічних пагонів верби плакучої жовтошкірої під час ізотермічної сушки всередині теплового блока ДМКИ-01 була використана платформа з плоскими комірками.

2.3 Експериментальна установка і методика проведення досліджень кінетики процесу сушіння

Експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння пряно-ароматичної сировини [42].

Дослідження процесу конвективного сушіння пряно-ароматичної сировини з метою вивчення основних закономірностей тепломасообміну проводилися на експериментальному стенді, принципова схема якого зображена на рис. 2.3. Експериментальний стенд складається з робочої камери 1, зони нагріву теплоносія 2, вентилятора 3, потенціометра 4, щита управління 5, ваг 6, генератора водяної пари 7, регулюючого автотрансформатора 8, психрометра 9 і трубки Піто 10 з мікроманометром 11.

Робоча камера (1) являє собою прямокутний канал, в центрі якого розміщується досліджуваний матеріал у вигляді одиничних зразків або шару. На бічних стінках камери є скляні вікна, через які можна спостерігати за станом зразків в процесі сушіння. Камера має штуцери для виходу термопар, трубки Піто і штанг ваг. Усередині сушильної камери зразок досліджуваного матеріалу обдувається

теплоносієм (повітря) з температурою, яку можливо змінювати в діапазоні від 30 до 150 °С.

Нагрівання повітря здійснюється за допомогою трисекційного електронагрівача потужністю 4,5 кВт, що дозволяє підтримувати і регулювати температуру повітря в широкому діапазоні. Підтримка заданого режиму здійснюється за допомогою одноточкового регулюючого потенціометра КСП-4 (4), підключеного до однієї секції калорифера, і регулюючого автотрансформатора РНО-250-10 (8), підключеного до другої секції калорифера. Точність спрацьовування сигнальних контактів потенціометра ± 1 °С.

Для приготування теплоносія з заданим вологовмістом використовується генератор пари ГК-100-2 (7), з'єднаний с камерою (1) голчастим вентиляем. Вологовміст теплоносія можливо підтримувати в діапазоні 10...200 г/кг с.в. Установа може працювати з повною рециркуляцією теплоносія та без неї.

Рух повітря відбувається за допомогою відцентрового вентилятора середнього тиску (3) по системі повітропроводів, що оснащена регулюючими заслінками. За допомогою заслінок змінювались в широкому діапазоні швидкість руху теплоносія та співвідношення подачі в систему відпрацьованого і свіжого теплоносія.

Температура повітря в сушильній камері замірялася і реєструвалася 6-точковим самописним потенціометром КСП-4 (4) [42]. Вологовміст теплоносія замірявся за допомогою психрометра (9), що складається з сухого і мокрого термометрів з ціною поділки 0,1 °С, встановлених у відповідному патрубку, в якому температура теплоносія знижувалася нижче за 100 °С і до 4-5 м/с підвищувалася його швидкість. Це забезпечувало необхідну точність при визначенні вологовмісту теплоносія психрометричним способом.

Витрата повітря вимірювалася за допомогою пневмометричної трубки (10) і мікроманометра МКВ-250 (11).

Зразок попередньо зважувався на аналітичних вагах ВЛР-200. Зменшення маси зразка в процесі сушіння контролювалося вагами ВЛКТ-500 (6).

Методика проведення досліджень і обробки дослідних даних

Після встановлення на стенді певного режиму сушіння в сушильній камері (1) розміщувалася перфорована корзина з досліджуваним зразком матеріалу. Корзина підвішувалася до ваг (6), які безперервно фіксували зменшення маси зразка в процесі його зневоднення. Запис зменшення маси матеріалу під час сушіння проводився в лабораторному журналі через постійні проміжки часу, який вимірювався за допомогою секундоміра.

Після закінчення дослідів зразок знімався з штока ваг і досушувався до абсолютно сухої маси в сушильній шафі. Залишковий вологовміст зразка (W_e) після закінчення кожного дослідів і контрольний вологовміст матеріалу.

При визначенні сухих речовин або вологи в продуктах переробки плодів і овочів (ГОСТ 28561-90) з аналітичної проби досліджуваного матеріалу беруть у висушену бюксу навішення масою 3-5 г з погрішністю не більше 0,01 г і розміщують у відкритому вигляді разом з кришкою в сушильну шафу з температурою 100-105 °С на 4 години. Потім бюксу закривають, охолоджують в ексикаторі протягом 20-30 хв. і зважують. Сушіння повторюють до постійної маси, яку визначають зважуванням кожну годину. Вважається, що постійна маса досягнута, якщо різниця між двома послідовними зважуваннями не перевищує 0,004 г. Для розрахунку приймають найменшу масу бюкси з навішення.

Вологість, розраховану по відношенню до маси сухої речовини матеріалу, тобто вологовміст W (у відсотках), обчислюють за формулою

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100, \quad (2.5)$$

де m_1 – маса бюкси з навішенням до висушування, г;

m_2 – маса бюкси з навішенням після висушування, г;

m_0 – маса пустої бюкси.

За результат випробувань приймають середнє арифметичне двох паралельних визначень. Обчислення проводять з погрішністю не більше 0,001%. Розбіжності між двома паралельними визначеннями не повинні перевищувати 0,25 %.

Для визначення поточного, змінного вологовмісту зразка необхідно знати його абсолютно суху масу:

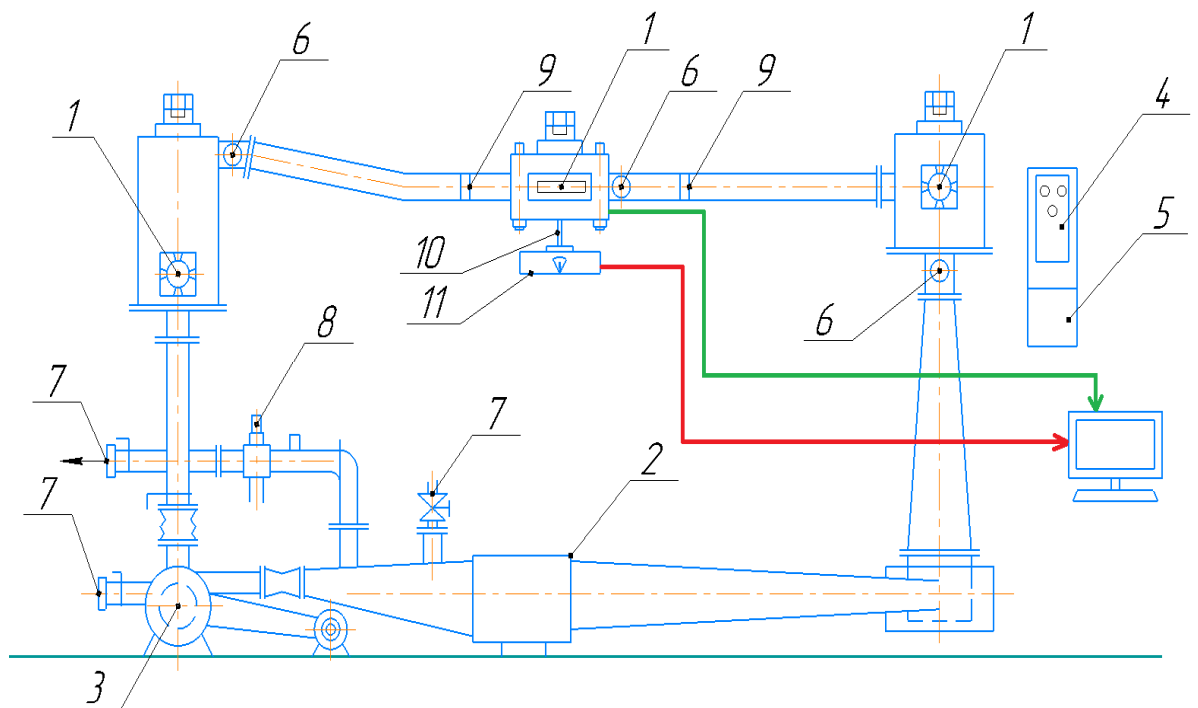


Рис. 2.3. Лабораторний стенд для конвективного сушіння:

1 – сушильні камери; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – регулятор температури; 5– щит управління; 6 – датчики температури; 7 – заслінки; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга ваг; 11 – ваги.

$$G_{a.c.} = G_{\dot{e}} - \frac{G_{\dot{e}} \cdot W_{\dot{e}}}{100},$$

(2.6)

де $G_{a.c.}$ – абсолютно суха маса зразка, г;

G_k – маса зразка після висушування на стенді, г;

W – залишковий вологовміст зразка, %.

За абсолютно сухою масою зразка визначають початковий вологовміст зразка і вологовміст зразка у фіксовані моменти часу в процесі сушіння:

$$W = \frac{(G \pm \sigma) - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100, \% \quad (2.7)$$

За експериментальними даними будувалися криві сушіння $W = f(\tau)$, криві швидкості сушіння $dW/d\tau = f(W)$, отримані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння, а також температурні криві $t = f(\tau)$.

2.4 Експериментальна установка і методика проведення досліджень теплообмінника-рекуператора типу “повітря-повітря”

Для проведення досліджень процесів теплообміну і гідродинаміки в полімерному теплообміннику-рекуператорі з метою узагальнення залежності ефективності теплопередачі від термодинамічних характеристик теплоносіїв в ІТТФ НАНУ створено лабораторну установку, представлену на рис. 2.6.

В дослідному елементі експериментальної установки – полімерному перехресно-проточному теплообміннику – встановлені навпіл перерізані листи сотового полікарбонату розміром 250x250 мм [43].

Було обрано полікарбонат з осередками перетином 4 мм та товщиною стінки 0,15 мм (рис. 2.3). Лист полікарбонату розпускався навпіл, утворюючи дві оребрені стінки розмірами 250x250 мм та висотою ребра 2 мм. Їх складала під кутом 90° відносно повздовжніх осей сот в пакет висотою 150 мм з перехресними каналами 4x2 мм.

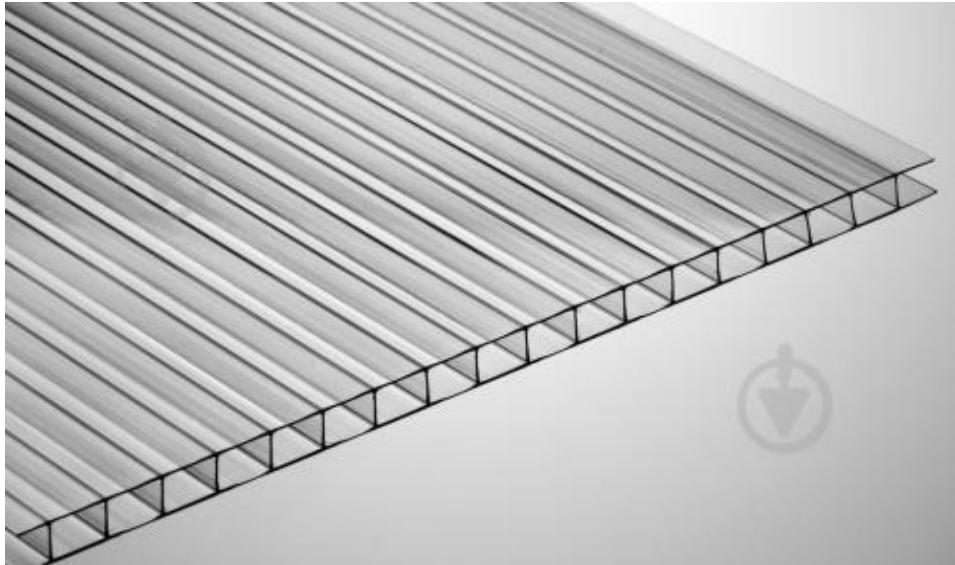


Рис. 2.4. Вигляд сотового полікарбонатного листа

Після того, як лист було розпущено, отримані поверхні склалися за принципом перехрестя каналів опорною стінкою до низу. В результаті утворювались канали для входу і виходу холодного і теплого теплоносія (рис. 2.5).

В нашому випадку цей пакет із сот складається в шар висотою 150 мм. Тобто залучено 75 сот в пакеті.

Також ми підключаємо до системи рекуператора-утилізатора вентилятор типу BVN BMFX для прогонки теплоносія [44]. Канальні осьові вентилятори змішаного типу серії BMFX розроблені спеціально для роботи з каналами великої протяжності та в умовах підвищених вимог до низького рівня шуму у приміщенні де вони встановлюються. Швидкість потоку теплоносія регулюється за допомогою спеціального перемикача.

Вентилятор підключається до труби, яка в свою чергу підключена до перехресно-проточного рекуператора типу «Повітря-повітря».

Для забезпечення теплообміну і підігріву повітря в рекуперативному теплообміннику і в дослідному контурі, ми підключаємо електричний підігрівач типу Вентс НК 100 – 0.

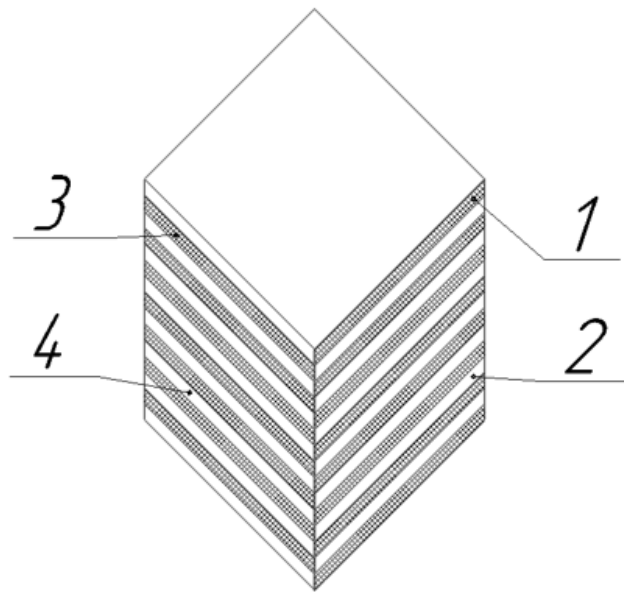


Рис. 2.5. Пакет полікарбонатних сот

1 – вхід холодного теплоносія в канали рекуператора. 2 – закрита (тилова) частина для холодного теплоносія. 3 – вхід теплого теплоносія в канали рекуператора. 4 – закрита (тилова) частина для теплого теплоносія.

Підігрівач може працювати в діапазоні від 0 до 100 градусів, коли в наших дослідах ми беремо робочі температури від 22 до 84 градусів.

Електричний нагрівач Вентс [45] НК 1000,81 з потужністю 0,8 кВт складається з корпусу, комутаційної коробки і нагрівальних елементів з нержавіючої сталі. Для герметичного з'єднання з повітроводами нагрівачі забезпечені гумовими ущільнювачами. Канальні нагрівачі НК обладнані двома термостатами захисту від перегрівання:

1. Основний захист з автоматичним перезапуском (температура спрацьовування +50 °С). Після охолодження термостат автоматично замикає керуючий ланцюг нагрівача.

2. Аварійний захист з ручним перезапуском (температура спрацьовування +90 °С). У разі спрацьовування, живлення на нагрівач можна подати тільки після ручного скидання аварії.

Робочим елементом лабораторної установки (рис. 2.6) є самостійно сконструйований рекуперативний перехресно-проточний полімерний повітря-повітряний теплообмінник 3. Повітря з приміщення 1, в якому розташована установка, вентилятором 2 спрямовується в канали холодної частини теплообмінника. Після проходження холодної частини повітря потрапляє в герметичний канал, в якому розташовано електричний нагрівач 4. Проходячи крізь нього повітря нагрівається і направляється в перехресні канали гарячої частини теплообмінника. В теплообміннику відбувається теплопередача між холодним і гарячим повітрям, після чого охолоджене повітря викидається в приміщення 1. Зазначена схема забезпечує однакову витрату гарячого і холодного теплоносія.

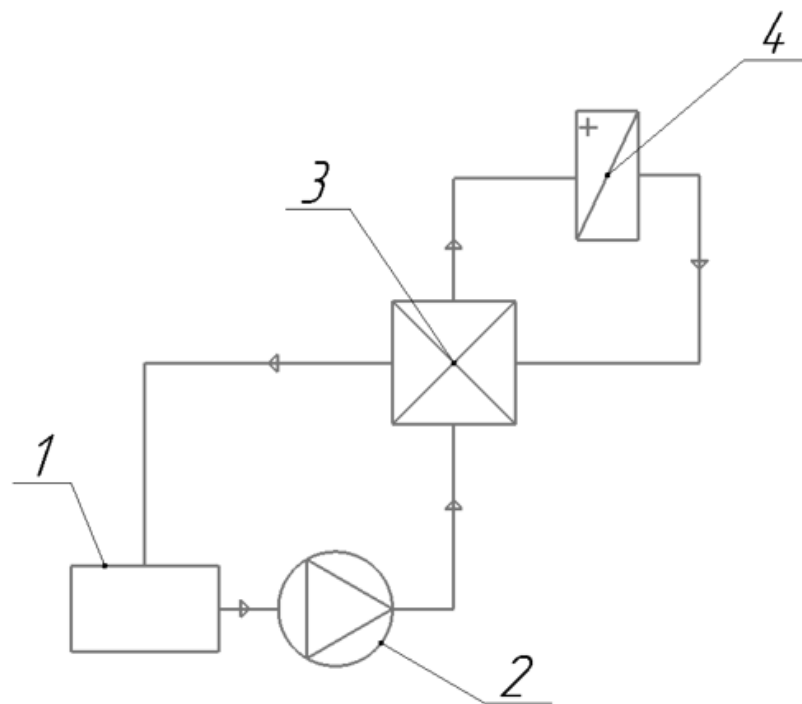


Рис. 2.6. Принципова схема лабораторної установки

1 – приміщення; 2 – вентилятор витяжного повітря; 3 – перехресно-протиточний полімерний теплообмінник; 4 – електричний нагрівач повітря

Загальний вид лабораторної установки представлено на рис. 2.7.

Теплообмінні поверхні теплообмінника виготовлялись з листів сотового полікарбонату (рис. 2.8).

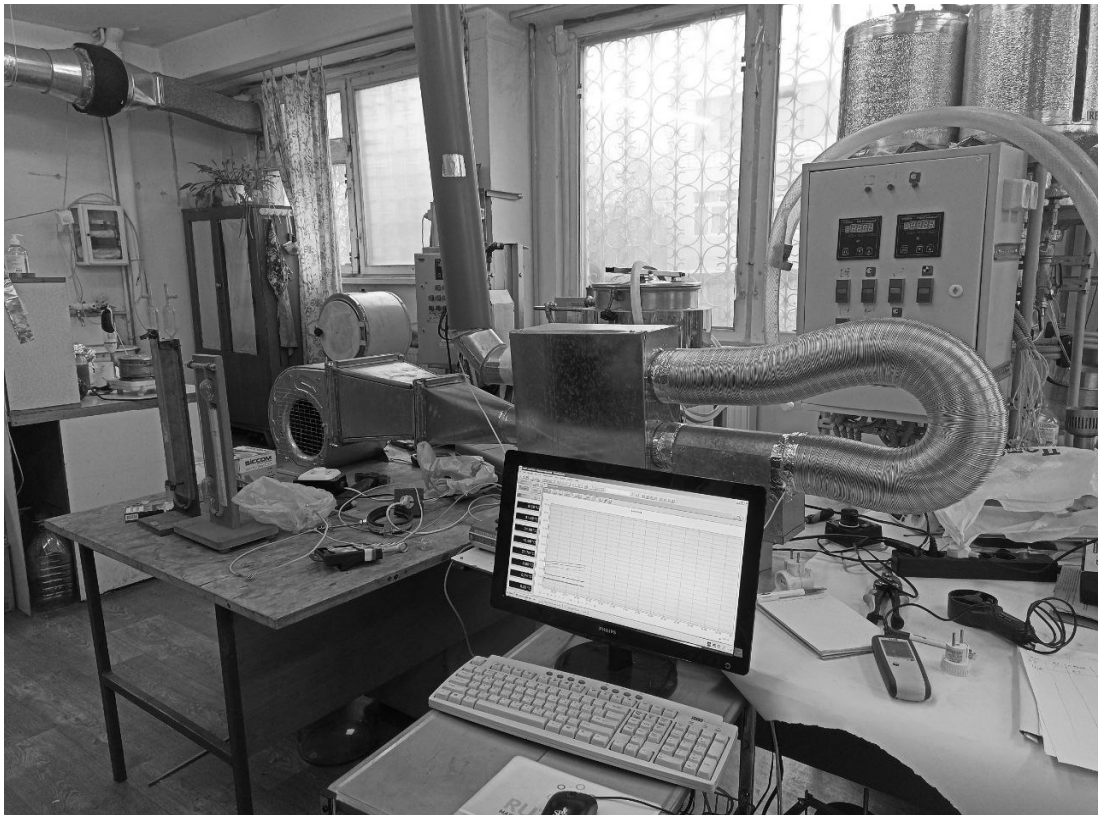


Рис. 2.7.. Загальний вид лабораторної установки

Установка (рис. 2.8) складається з теплообмінника 1, що складається з панелей стільникового полімеру, в якому два потоки повітря – видалений і зовнішній, повністю розділені та не контактують один з одним.

Зовнішнє повітря нагнітається припливним вентилятором, проходячи встановлену термопару 5 на вході в рекуператор, за якою визначається його температура, що фіксується за допомогою реєстратора 6 температур, потрапляє в рекуператор 1, де нагрівається від повітря, що видаляється і проходить за поділяючою полімерною стінкою. Термопарою 3 реєструється температура припливного вже нагрітого повітря на виході з установки.

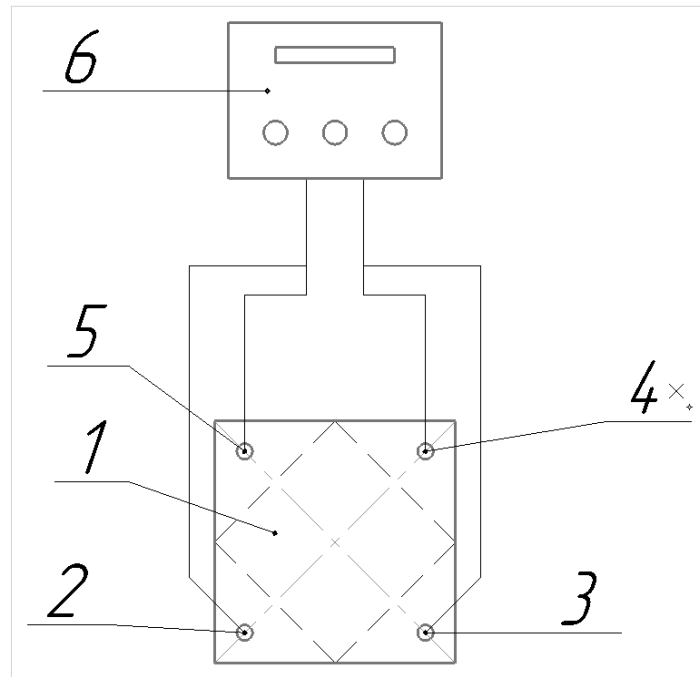


Рис. 2.8. Принципова схема установки-утилизатора тепла

1 –пластинчатий полімерний теплообмінник; 2 – термопара t_{21} ; 3 – термопара t_{12} ; 4 – термопара t_{22} ; 5 – термопара t_{11} ; 6 – реєстратор температури

Витяжне повітря, що видаляється з приміщення за допомогою вентилятора, проходить термопару 4, вимірювання на якій фіксується на реєстраторі температури 6. Далі тепле витяжне повітря, проходячи через щілинні канали рекуператора, віддає теплоту через повітронепроникну стінку припливному повітрю. Температура на виході витяжного повітря вимірюється за допомогою термопар 1. Відпрацьоване витяжне повітря видаляється з приміщення.

Температура фіксується за допомогою термопар, які дають сигнали на автоматизований потенціометр 6, типу КСП – 4 [46].

Багатоканальний автоматичний реєструючий прилад – потенціометр КСП-4, призначений для вимірювання сили та напруги постійного струму, а також неелектричних величин, перетворених на електричні сигнали та активний опір.

Швидкість повітря в рекуператорі вимірюється за допомогою анемометра. Показники анемометра відображаються на екрані планшета,

який підключено до самого анемометра. Анемометр є дуже чутливим, тому мінімальна швидкість вимірювання 0,1 м/с.

Методика проведення експериментальних досліджень.

При проведенні дослідів на експериментальній установці необхідно дотримуватись такої послідовності дій:

1. Підключається вентилятор і підігрівач повітря до живлення.
2. Вмикається вентилятор на мінімальну позначку.
3. На підігрівачі повітря виставляється потужність 300 Вт.
4. Слід почекати, поки не буде досягнуто сталого теплового режиму, який фіксується КСП – 4 і відображається на екрані монітору у вигляді горизонтальної лінії.
5. Як температура на екрані стабілізується в горизонтальну пряму, включається автоматичний запис фіксації всіх температур на термопарах.
6. До труби, де виходить підігріте повітря підноситься анемометр і фіксується швидкість повітря. Результати вносяться в журнал вимірювань.
7. Потужність вентилятора змінюється і досліди повторюються для нового гідродинамічного режиму.
8. Виконання пунктів 4 – 6 слід повторювати 8 – 10 разів, постійно збільшуючи потужність вентилятора. Потужність змінюється перемиканням відповідного тумблера на вентиляторі на наступну позначку.

Методика обробки результатів.

Для визначення коефіцієнтів теплопередачі для кожного дослідів, результати потребують обробки. Для розрахунку характеристик найпростішим є режим роботи теплообмінника без фазового переходу у каналі. Для встановлених в ході проведення дослідів на експериментальній установці режимів конденсації пари при охолодженні гарячого теплоносія не спостерігалось.

При оцінці ефективності роботи теплообмінних апаратів достатньо поширеним є метод чисел одиниць переносу теплоти [47]. Відхід від залучення в обрахування традиційних коефіцієнтів теплопередачі пов'язаних

зі значними труднощами визначення істинної поверхні контакту теплоносіїв [48]. Залучення більш укрупнених величин дозволяє більш точно оцінити ефективність роботи теплообмінника.

Згідно з методом чисел одиниць переносу теплоти, ефективність рекуператорів визначається як відношення кількості теплоти, що передається через теплообмінну поверхню до повної кількості теплоти, яка могла би бути передана у досконалому теплообміннику (з ККД 100 %).

Отже, основною характеристикою теплообмінника є величина NTU – кількість одиниць теплообміну, яка дорівнює:

$$NTU = \frac{k \cdot F}{W_{\min}}, \quad (2.8)$$

де k – загальний коефіцієнт теплопередачі, що віднесений до одиниці поверхні, Вт/(м²·°C);

F – загальна площа однієї сторони теплообмінної поверхні, м²;

W_{\min} – мінімальний водяний еквівалент, що вибирається зі значень W для холодного і гарячого теплоносія, $W = c_p \cdot G$, Вт/°C,

де c_p – питома ізобарна теплоємність середовища, Дж/(кг·°C);

G – масова витрата, кг/с.

З використанням величини NTU ефективність теплообмінника визначається формулою:

$$\eta = \frac{1 - \exp \left[-NTU \cdot \left(1 - \frac{W_1}{W_2} \right) \right]}{1 - \frac{W_1}{W_2} \exp \left[-NTU \cdot \left(1 - \frac{W_1}{W_2} \right) \right]}. \quad (2.9)$$

Тут індекси 1 та 2 відносяться до двох каналів теплообмінника. Для випадку рівних масових витрат вираз для ефективності теплообмінника спрощується і має вигляд:

$$\eta = \frac{NTU}{1+NTU} \quad (2.10)$$

Проблемним моментом розрахунку NTU є визначення значення k . Оскільки вимірювання проводяться при встановленні в теплообміннику сталого режиму, коефіцієнт теплопередачі приймається постійною величиною, яка розраховується за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.11)$$

Тут α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі на поверхні теплообміну з боку першого та другого середовищ Вт/(м²·°C);

λ – коефіцієнт теплопровідності стінки Вт/(м·°C);

δ – товщина стінки полікарбонатної соти, м.

Для порівняння термічного опору пластин з полікарбонату та пластин з міді, було прораховано термічний опір обраної для теплообмінних поверхонь стінки з полікарбонату товщиною 0,000015 м, і мідної стінки товщиною стінки 0,001 м. Значення $\frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}}$ у обох випадках дорівнює 0,013. Це свідчить про те, що за рахунок малої товщини полікарбонатних стінок досягається мале значення термічного опору теплопередачі.

Визначимо коефіцієнти тепловіддачі α_1 та α_2 у каналах теплообмінника.

У припливних та витяжних каналах середнє значення коефіцієнта турбулентного потоку повітря α_i ($i=1,2$) у каналі теплообмінника можна розрахувати таким чином:

$$\alpha_i = 3,51 \cdot v_i^{0,8} \cdot d^{-0,2}, \quad (i=1,2) \quad (2.12)$$

де v_i – швидкості руху повітря в каналах рекуператора, м / с;

d – еквівалентний діаметр каналу, яким рухається повітря в теплообміннику.

При ламінарному режиму руху повітря в каналах теплообмінника та при великих значеннях відношення довжини каналу теплообмінника до його ефективного діаметра величина α_i ($i=1, 2$) стає практично постійною і визначається лише ефективним діаметром каналу:

$$\alpha_i = 0,1 \cdot d^{-1}. \quad (2.13)$$

Для оцінки вірогідності виникнення конденсації вологи та замерзання теплообмінників визначається розподіл температури по довжині теплообмінника. Наведено залежність значення температури по довжині протиточного теплообмінника при різних та рівних масових витратах теплообмінного середовища.

При рівних масових витратах повітря у припливному та витяжному каналах теплообмінника отримаємо залежність віддаленої температури повітря від відстані від точки входу до теплообмінника у вигляді:

$$T(x) = T_{in} - \frac{(T_{in} - T_{out}) \cdot x}{L + (\beta_1 + \beta_2)}, \quad (2.14)$$

де T_{in} – це температура на вході;

T_{out} – температура на виході;

l – довжина каналу в рекуператорі;

$$\beta_1 \text{ і } \beta_2 – \text{ коефіцієнти, } \beta_1 = \frac{c_p G_1}{\alpha_{out} l_1}, \quad \beta_2 = \frac{c_p G_2}{\alpha_{in} l_2}.$$

Для випадку різних значень витрати повітря в каналах залежність температури повітря, що йде від відстані до точки його входу в рекуператор набуває вигляду

$$T(x) = T_{in} - \frac{T_{in} - T_{out}}{\kappa + 1} \cdot \frac{1 - e^{-\gamma x}}{1 - e^{-\gamma L}}. \quad (2.15)$$

Тут γ – коефіцієнт, що має розмірність m^{-1} , $\gamma = \frac{1 - \delta}{\beta_1 + \delta \cdot \beta_2}$, де $\delta = \frac{G_1}{G_2}$.

При перестановці температур повітря у приміщенні та зовнішнього повітря виходить аналогічне рівняння для залежності температури припливного повітря від відстані до нього від входу теплообмінник.

2.5 Розрахунок похибок

Виготовлення хромель-копелевих термоелектричних термометрів виконувалось на базі ІТТФ НАН України. Величина королька дорівнювала 0,2 мм, тарування проводилось при температурі 15...99 °С. Результати тарування апроксимувались за методом найменших квадратів математичними виразами виду $t = ken$. Відносна похибка апроксимації складала 1%. У таблиці 2.3 подаються апроксимуючі рівняння для термопар, які використовувались в дослідженнях.

Прямому вимірюванню підлягали термоелектрорушійні сили термоелектричних термометрів, атмосферний тиск, температури сухого і мокрого термометра, швидкість руху повітря, маса дослідного зразка, геометричні розміри дослідного зразка, час.

Таблиця 2.3
Характеристики термоелектричних термометрів

Позначення величини, що вимірюється	Рівняння	Одиниця вимірювання	Середнє квадратичне відхилення, °С
t_1	$t = 15,384 \cdot e^{0,969}$	°С	±0,30
t_2	$t = 15,425 \cdot e^{0,974}$	°С	±0,32
t_3	$t = 15,402 \cdot e^{0,970}$	°С	±0,33

e – величина термо-ЕРС, мВ

У табл. 2.4 подано перелік величин, які підлягали безпосередньому вимірюванню, вказано прилади, їх допустимі діапазони використання та похибки вимірювань.

Розрахунок похибок прямого та непрямого вимірювань виконувався з використанням існуючих методик обробки результатів досліджень. Оцінка похибок вимірювання експериментальних даних виконувалась, базуючись на теорії імовірності та теорії похибок [49]. Довірчий інтервал шуканої величини визначався з імовірністю $\alpha = 0,95$ (ступінь ризику $p = 0,05$). Результати записувались у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta_{\Sigma} \quad (2.16)$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення величини;

Δ_{Σ} – значення абсолютної похибки вимірювання, залежить від умов проведення експерименту та складається з суми систематичної та раптової похибок.

Визначення необхідної кількості прямих вимірювань приводилося за методикою, запропонованою [49]. При цьому враховувалося, що зменшення раптової похибки Δ_p до значення, меншого $1/3$ величини сумарної систематичної похибки, є недоцільним.

Порядок розрахунку:

1. Визначається середньоквадратична похибка прямого вимірювання за залежністю (2.9):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2.17)$$

де n – кількість вимірювань;

x_i – значення випадкової величини.

2. Визначається допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta'}{3} \quad (2.18)$$

де δ' - систематична похибка (гранично допустима похибка приладу).

3. Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S}, \quad (2.19)$$

4. За значенням ε за таблицею, наведеною в [49], знаходиться необхідна кількість вимірювань.

Сумарна похибка результату прямого вимірювання розраховується за залежністю (2.12):

$$\Delta_{\Sigma} = \delta' + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.20)$$

де $t_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стюдента (приймається при імовірності $\alpha = 0,95$);

n – кількість дослідів;

Відносна похибка результату прямого вимірювання розраховується:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.21)$$

Таблиця 2.4

Характеристика вимірювальних приладів

Назва величини	Назва приладу	Одиниця вимірювання	Границі вимірювання	Гранична допустима похибка приладу, %
Термоелектро-рушійна сила	Мультиметр цифровий (UT70D)	мВ	0...80	±0,05 %±40P
Маса	Електронні ваги (Axis AD500)	г	0...500	±3,0%
Температура сухого термометра	Гігрометр психрометричний ВІТ-1	°С	0...25	±3,0%
Температура вологого термометра				
Час	Секундомір електронний	с	10÷60	±(0,1%÷0,02%)
Атмосферний тиск	Барометр (БТК-СН14)	мм. рт. ст.	695...805	±3,0%
Швидкість руху повітря	Анемометр (МС-13)	м/с	0...20	±0,05%
Геометричні розміри зразка	Штанген-циркуль (ШЦ-3-400-100/150)	мм	0...150	±0,05%

Необхідна кількість вимірювань та значення похибок результатів прямих вимірювань подано в таблиці 2.5.

У випадку, коли невідома величина є функцією двох або більшої кількості незалежно змінюваних величин $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, абсолютне значення похибки визначаємо за залежністю (2.14), [49]:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_{\Sigma i} \right)^2}, \quad (2.22)$$

де $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ – часткова похідна по змінній X_i , сумарна абсолютна похибка якої дорівнює $\Delta_{\Sigma i}$.

Таблиця 2.5

Похибки результатів прямих вимірювань

Назва величини	Одиниця вимірювання	Систематична похибка (за класом точності)	Середньоквадратичне відхилення	Гранична систематична похибка	Довірчий інтервал (в долях середньоквадратичної похибки)	Число вимірювань	Коефіцієнт Стюдента ($p = 0,95$)	Абсолютна похибка (ф-ла 2.12)	Відносна похибка, % (ф-ла 2.13)
Термоелектрорушійна сила	мВ	0,040	0,037	0,0133	0,360	30	2,0	0,0535	3,5÷0,9
Маса	г	0,015	1,44·10 ⁻²	0,005	0,347	35	2,1	2,010 ⁻²	1,3
Температура сухого термометра	°С	2,1	0,78	0,7	0,897	9	2,3	2,698	2,6
Температура вологого термометра	°С	2,1	0,8	0,7	0,875	9	2,3	2,713	2,4
Час	с	0,01	8,2·10 ⁻⁴	0,00333	0,901	9	2,3	1,28·10 ⁻²	0,13
Атмосферний тиск	мм рт. ст.	2,4	0,98	0,8	0,813	11	2,2	3,05	0,4
Швидкість руху повітря	м/с	0,01	5·10 ⁻³	0,00333	0,666	15	2,1	1,27·10 ⁻²	0,75

Відносна похибка результатів непрямих вимірювань розраховується за залежністю (2.13), де замість величини x розглядається Y , а замість сумарної похибки $\Delta_x - \Delta Y$. Значення похибок непрямих вимірювань подано в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Похибки непрямих вимірювань

Назва величини	Одиниця вимірювання	Абсолютна похибка	Діапазон зміни величини	Відносна похибка, %
Температура	°С	0,8	20,0÷120,0	4,0÷0,9
Витрата повітря	м ³ /с	1,57·10 ⁻³	1,44·10 ⁻² ÷2,64·10 ⁻²	10,9÷5,9
Волість матеріалу	%	0,3÷1,2	6÷87	4,0÷0,6
Швидкість сушіння	%/хв	2,5·10 ⁻³	0,1÷4,1	2,5÷0,06

Висновки до розділу 2

1. У розділі наведено опис експериментальних установок, приладів та методик проведення досліджень та обробки отриманих даних, які використовувались під час експериментів з посиланням на відповідні джерела та нормативну документацію.

2. Під час досліджень використовували наступні стенди, прилади та методики:

- експериментальний сушильний стенд для вивчення процесів тепломасообміну при зневодненні ККПМ – для встановлення енергоефективних режимів сушіння пряно-ароматичної сировини;
- диференційний мікрокалориметр випаровування „ДМКИ-01” – для визначення питомої теплоти випаровування води з м’яти перцевої;
- метод Ван Бамелена – для дослідження адсорбційних властивостей м’яти перцевої;
- експериментальний стенд для дослідження теплових параметрів рекуперативного теплообмінника.

3. Розрахунок та аналіз похибок експериментальних досліджень та вимірювань підтвердив точність отриманих даних.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Сорбційні властивості пряно-ароматичної сировини

При вивченні технологічних властивостей матеріалів важливе значення має аналіз ізотерм адсорбції, що представляють функціональну залежність між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу при постійних температурі й тиску. Під час сушіння для досягнення бажаного результату температура та вологість сушильного агента повинні відповідати заданому кінцевому вологовмісту матеріалу. Саме за ізотермами адсорбції встановлюється зв'язок між тепловологісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу в процесі сушіння [16].

Тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена (див. підрозділ 2.1) одержана ізотерма адсорбції пари води м'ятою при температурі 30 °С, яка має форму характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів (рис.3.1). Використовуючи метод характеристичних кривих, заснований на потенційній теорії сорбції, за цією ізотермою визначені рівноважні вологовмісти для 40 та 50 °С.

Ізотерми відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води), де можна виділити згідно з рис.1.7 три інтервали p/p_s за взаємодією води з матеріалом та її активністю в біохімічних реакціях. У інтервалі p/p_s від 0 до 0,2 (вологовміст матеріалу нижче 10 %) вода міцно зв'язана і не доступна для біохімічних реакцій. У інтервалі p/p_s від 0,2 до 0,7 вода адсорбційно зв'язана і доступна для реакцій неферментативного потемніння, в цьому інтервалі вологовміст матеріалу становить 10-16 %. У інтервалі p/p_s від 0,7 до 1 вода слабо зв'язана капілярними силами і доступна як для розвитку мікроорганізмів, так і для хімічних реакцій. За ізотермами адсорбції встановлюємо, що для запобігання мікробного псування вологовміст висушеної м'яти не повинен перевищувати 16 %, при

вологості меншому ніж 10 % унеможливаються будь-які біохімічні реакції [4].

Для забезпечення високої якості висушеної пряно-ароматичної сировини основне завдання сушіння полягає в максимальному збереженні ефірних олій, а також в припиненні руйнівної дії ферментів або в зменшенні її до мінімуму. Тому м'яту перцеву необхідно сушити до залишкового вологості, що не перевищує 10 %, висушений матеріал слід упаковувати в герметичну тару та зберігати в чистому, сухому, прохолодному, добре провітрюваному приміщенні, в якому необхідно забезпечити контроль вологості й температури повітря [1].

Слід зазначити, що в гігроскопічній області (зона зв'язаної вологи), тиск пари води над поверхнею матеріалу відрізняється від тиску насичення і залежить від його вологості й температури. За отриманими ізотермами адсорбції пари води м'ятою перцевою у вигляді залежності $W = f(p/p_s, t)$, використовуючи $p_s = f(t)$, зображуємо ізотерми адсорбції в системі координат $p - W$ (рис. 3.2).

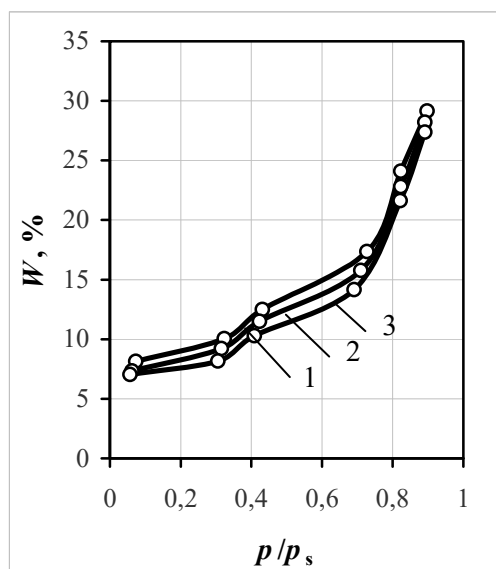


Рис. 3.1. Ізотерми адсорбції пари води м'ятою перцевою: 1 – 30 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50°С.

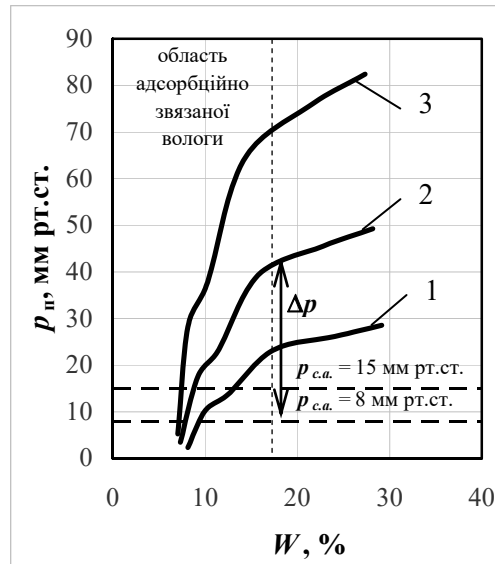


Рис. 3.2. Залежність парціального тиску пари води на поверхні м'яти перцевої від вологовмісту і температури: 1 – 30 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50 °С.

Для запобігання втрати ароматичних речовин зневоднення пряно-ароматичної сировини необхідно проводити при низьких температурах. Для такого «м'якого» довготривалого процесу сушіння справедлива гіпотеза про локальну термодинамічну рівновагу, згідно з якою в кожен малий проміжок часу на кордоні розділу фаз встановлюється рівновага. Умови локальної рівноваги з'ясовуються з ізотерм адсорбції, що дозволяє визначити парціальний тиск пари води над поверхнею матеріалу p_n і, отже, масообмінний натиск Δp . З експериментальних даних для м'яти (рис. 3.2) встановлено, що в гігроскопічній області у міру зменшення вологовмісту матеріалу і при зниженні його температури тиск пари води на поверхні зменшується і при наближенні до вологовмісту 10 % стає сумірним з тиском в навколишньому пароповітряному середовищі. [4]

За ізотермами адсорбції визначають тепловологісні параметри сушильного агента, при яких можливо провести досушування м'яти перцевої до заданого залишкового вологовмісту. В кліматичних умовах України влітку в період збирання та переробки м'яти перцевої вологовміст атмосферного повітря коливається в широкому діапазоні від 8 до 20 г/кг с.п. У разі традиційного конвективного сушіння такі коливання вологовмісту

повітря, що надходить до сушарки, приводять до коливання вологості сушильного агента. Так, при температурі сушильного агента 40 °С його вологість буде змінюватись згідно *H-d* діаграмі вологого повітря в діапазоні від 18 до 42 %, таким умовам відповідає рівноважний вологовміст матеріалу в межах 8-12 %. При 50 °С вологість сушильного агента змінюється від 10 до 25 %, а рівноважний вологовміст – в межах 7-8 %. Аналіз гіротермічної рівноваги м'яти перцевої показав, що при температурі 40 °С і високій відносній вологості більше ніж 38 % сушильного агента не можливо досушити м'яту до заданого залишкового вологовмісту 10 %, тому що матеріал приходить до стану рівноваги з сушильним агентом раніше, і процес зневоднення припиняється. Таким чином, на заключному етапі сушіння під час видалення адсорбційно-зв'язаної вологи вологовміст сушильного агента при температурі 40 °С не повинен перевищувати 17 г/кг с.п. [1].

3.2 Визначення питомої теплоти випаровування

Користуючись ізотермами адсорбції, можна пов'язати класифікацію стану вологи в матеріалі з процесом її видалення під час сушіння [50, 51], а також одержати дані щодо теплоти випаровування вологи різних форм і видів зв'язку з матеріалом, тобто мати можливість дати енергетичну характеристику зв'язаній волозі. Рослинні тканини утримують крім вологи з фізико-механічною формою зв'язку й адсорбційно-зв'язану вологу. Для видалення адсорбційно-зв'язаної вологи необхідно підвести до матеріалу більше енергії, чим при випаровуванні вільної води. Загальні витрати енергії на видалення вологи з рослинних тканин при сушінні визначаються як сума питомої теплоти випаровування вільної води r і чистої теплоти адсорбції q_a : $q = r + q_a$ [53].

Знання теплоти адсорбції має велике значення при проектуванні обладнання для зневоднення та при розробленні енергоефективних режимів сушіння пряно-ароматичних рослин. Це пов'язано з тим, що теплота

випаровування сорбованої води може зростати до значень, що перевищують теплоту пароутворення чистої води, оскільки пряно-ароматичні рослини зневоднюються до низького залишкового вологовмісту (5-15 %), при якому вода в матеріалі знаходиться в зв'язаному стані [52].

В теперішній час для визначення теплоти адсорбції харчових продуктів використовується два методи [53]:

- прямий метод калориметричного вимірювання теплоти, що виділяється під час сорбції;
- термодинамічний метод з застосуванням рівняння Клаузіуса-Клейперона з визначенням чистої ізостеричної теплоти адсорбції q_a .

У разі видалення зв'язаної води загальні витрати енергії на випаровування визначаються ізостеричною теплотою адсорбції q_{st} , яка складається з питомої теплоти паротворення r і чистої теплоти адсорбції q_a . Ізостерична теплота адсорбції q_{st} , розраховується за рівнянням Клаузіуса-Клапейрона [12]:

$$\frac{(\partial \ln p)}{(\partial \ln T)} = \frac{q_{st}}{RT^2}, \quad (3.1)$$

Використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона, визначаємо чисту теплоту адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням

$$q_a = \left[\ln \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] R, \quad (3.2)$$

За ізотермами адсорбції листя м'яти при різних температурах розраховані ізостери, що відображають взаємозв'язок рівноважних температур і відносного тиску при постійному вологовмісті матеріалу, за якими визначалась чиста ізостерична теплоти адсорбції q_a .

На рис. 3.3 наведена залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції, що розрахована для температури 40 °С, від вологовмісту матеріалу. Як видно, теплота адсорбції в області слабо зв'язаної води поступово зростає із зменшенням вологовмісту, в діапазоні від 24 до 20 % спостерігається зниження теплоти, що пов'язане з впливом на випаровування води летких

речовин ефірної олії м'яти. Далі теплота адсорбції різко збільшується в області адсорбційно-зв'язаної вологи. Питома теплота випаровування q слабо зв'язаної води незначно перевищує теплоту паротворення. Витрати ж енергії на випаровування адсорбційно-зв'язаної вологи збільшуються при досягненні матеріалом вологовмісту 12 % на 29 % в порівнянні з теплотою паротворення вільної води, тобто відношення $q / r = 1,29$ [1].

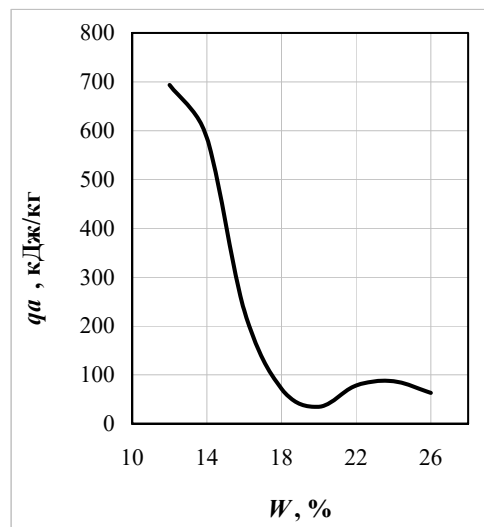


Рис. 3.3. Чиста ізостерична теплота адсорбції пари води м'ятою перцевою

В реальному процесі сушіння одночасно з водою з поверхні листка м'яти випаровуються леткі ефірні олії. В природі ефірні олії виконують таку важливу функцію як регулювання транспірації та захисту рослин від перегрівання вдень, переохолодження вночі. Багато компонентів ефірних олій, які особливо інтенсивно виділяються в атмосферу саме в спекотну погоду, мають високу теплоту випаровування, що дієво запобігає перегріванню тканин. Для м'яти перцевої такий вплив може чинити основний леткий ароматичний компонент ефірної олії (30–55 %) – (-)-Ментол (1-ментол чи (1R,2S,5R)-ментол). За фізичними властивостями ментол – це безбарвні шестикутні кристали, як правило, голчасті або у вигляді кристалічного порошку з приємним м'ятним запахом. Його температура плавлення при нормальних умовах становить 315,60 К (42,5 °C), а ентальпії

випаровування та сублімації становлять $\Delta_{\text{vap}}H = 56,37$ кДж/моль та $\Delta_{\text{sub}}H = 95,8$ кДж/моль, відповідно [15, 16]. Друга основна летка сполука ефірної олії (14-32 %) – ментон, який являє собою безбарвну рідину з м'ятним запахом. Ентальпія випаровування ментону становить $\Delta_{\text{vap}}H = 50,1$ кДж/моль [17].

Дослідження витрат енергії на зневоднення в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої було проведено шляхом визначення змін у витратах теплоти на випаровування на диференціальному мікрокалориметрі випаровування ДМКИ-01, зовнішній вигляд мікрокалориметра випаровування розглянутий в підрозділі 2.2.

Результати дослідження теплоти на випаровування в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої наведені на рис. 3.4 в координатах значень питомих витрат теплоти на сушіння, приведених до питомої теплоти випаровування чистої води при відповідній температурі ($R = q_{\text{витрачене}} / r_{\text{води}}$) [1, 56].

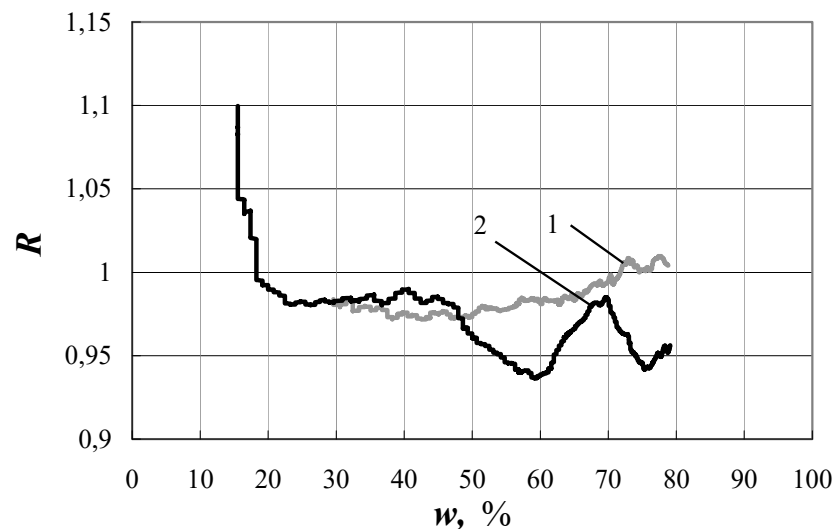


Рис. 3.4. Залежність від відносної вологості приведених питомих витрат теплоти на висушування листя м'яти перцевої при температурі сушіння:

1 - 40 °C; 2 - 50 °C

Експериментально отримані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурі 40 °C (рис. 3.4, крива 1) відповідають теплоті випаровування чистої води ($R=1$) лише на початку процесу. Очевидно, тут

відбувається природна втрата води листям крізь устячка, які призначені для транспірації. Але вологість 70 % відносних стає критичною для листя. Тому до процесу випаровування води приєднується процес випаровування летких ароматичних сполук з залоз-трихом на поверхні листя. Свідченням цього є спадання величини R нижче теплоти випаровування чистої води та поява сильного аромату м'яти у повітрі, яке видаляється з калориметричної камери. Виділення летких ароматичних сполук з листя відбувається протягом всього подальшого процесу сушіння, монотонно, паралельно з видаленням вільної води [1, 54].

Експериментально отримані значення питомих витрат теплоти на висушування листя м'яти при температурі 50 °C (рис. 3.4, крива 2) вказують на значне випаровування летких сполук з самого початку процесу. Також, на кривій витрат теплоти спостерігаємо ендотермічні піки, можливо, обумовлені плавленням ментолу, чи випаровуванням інших ароматичних речовин (ментону, жасмону, пулегону тощо). Періодичне повернення витрат теплоти до значення теплоти випаровування чистої води може свідчить про закінчення процесу плавлення, чи про вичерпання запасів відповідної леткої сполуки. Подальша (після досягнення вологості 45 % відн.) відповідність кривої витрат теплоти при 50 °C значенням кривої витрат теплоти при 40 °C свідчить про подальше випаровування ментолу, концентрація якого в ефірних оліях м'яти найбільша. Різке зростання витрат теплоти (вище теплоти випаровування вільної води) наприкінці процесу сушіння свідчить про початок видалення з листя адсорбційно-зв'язаної води: з міжклітинних капілярів, адсорбованої біополімерами мембран та води гідратних сфер розчинених речовин [1]. Цей момент добре погоджується з зростанням чистої ізотеричної теплоти адсорбції в області адсорбційно-зв'язаної вологи (рис. 3.3).

3.3 Експериментальні та аналітичні дослідження кінетики процесу сушіння пряно-ароматичної сировини

Експериментальні дослідження основних закономірностей тепло- і масообміну при сушінні м'яти проводилися на лабораторній установці з конвективним підведенням теплоти в горизонтальній камері при подовжньому обтіканні шару матеріалу сушильним агентом та за методикою, що описана в підрозділі 2.3.

Під час конвективного сушіння парогазова суміш, яка оточує матеріал, одночасно є і теплоносієм, і середовищем, що сприймає пару, тому якісні параметри (температура, вологість, швидкість руху) сушильного агента значно впливають на процес тепло- і масообміну а, отже, і на весь процес сушіння. Якість висушеного матеріалу також залежить від температури, вологості і швидкості руху сушильного агента. Для встановлення впливу одного з параметрів процесу на тривалість сушіння та якість продукту, інші – підтримувалися незмінними [16, 54].

Для досліджень свіжа трава м'яти перцевої була придбана у місцевого виробника в Україні. Початкове значення вологості листя м'яти у свіжому стані визначалося за ДСТУ 7804:2015 перед кожним експериментом і варіювалось в межах для стебл з листками 88,3-91,2%, для листків і стебл 75,6-77,9% та 88,7-91,7 % відповідно.

Дослідження кінетики сушіння проводились окремо для листків, стебел та цілої рослини (стебла з листками). Стебла м'яти з листками різали на шматки довжиною 10...12 см і викладали їх на піддон шаром 2...2,5 см, листя або стебла викладали шаром 1 см. Дослідження проводилися в межах змінювання режимних параметрів процесу: температури сушильного агента – від 30 до 50 °С; швидкості сушильного агента – 1...2 м/с; вологовмісту сушильного агента – 6...14 г/кг с.п.; початкового питомого навантаження матеріалу – 1,7 кг/м².

Критерієм вибору раціональних режимів зневоднення пряно-ароматичної сировини є збереження природного біопотенціалу, зниження втрат біологічно активних речовин і ефірних олій у висушеній траві при забезпеченні максимально можливої енергоефективності процесу сушіння.

Для встановлення впливу температури сушильного агента на тривалість зневоднення м'яти перцевої дослідження процесу сушіння проводилися при температурах теплоносія 30, 40 і 50 °С та при незмінних швидкості теплоносія $v = 2$ м/с і вологовмістові 6 та 14 г/кг с.п.

Для визначення основних закономірностей процесу зневоднення м'яти перцевої кінетику сушіння листків та стебел досліджували в одиничному шарі.

Встановлено, що підвищення температури сушильного агента з 30 до 40 °С сприяє скороченню тривалості сушіння листків м'яти до вологовмісту матеріалу 10 % з 1010 до 620 хв. (тобто у 1,6 рази), а збільшення температури з 40 до 50 °С приводить до зменшення тривалості сушіння з 620 до 310 хв. (у 2 рази). Швидкість сушіння листків м'яти в початковий момент при температурі сушильного агента 50 °С в 4 рази вища, ніж при 30 °С (рис 3.5).

Стебла м'яти мають більший початковий вологовміст і сохнуть до залишкового вологовмісту 10 % значно довше. Встановлено, що підвищення температури сушильного агента з 30 до 40 °С сприяє скороченню тривалості сушіння стебел м'яти з 1720 до 1600 хв. (тобто у 1,08 рази), а збільшення температури з 40 до 50 °С приводить до зменшення тривалості сушіння з 1900 до 1720 хв. (у 1,1 рази). Швидкість сушіння стебел м'яти в початковий момент при температурі сушильного агента 50 °С в 1,86 рази вища, ніж при 30 °С (рис 3.6).

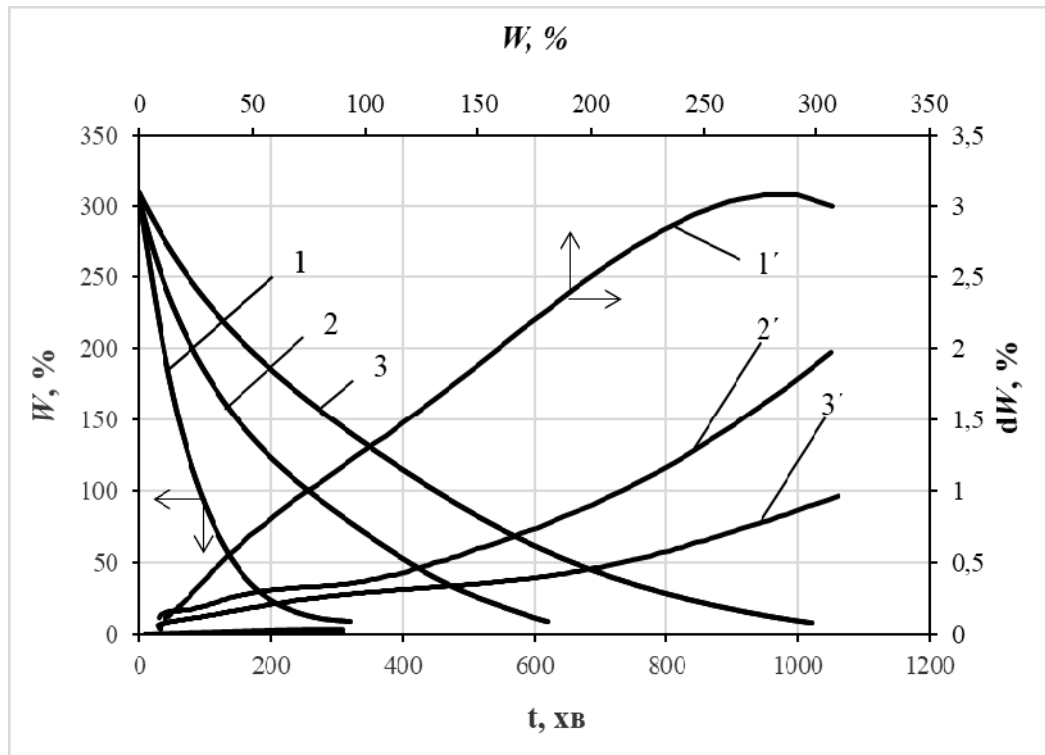


Рис. 3.5. Вплив температури сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння листків м'яти перцевої.

Режимні параметри: 1, 1' – $t = 50$ °C; 2, 2' – $t = 40$ °C; 3, 3' – $t = 30$ °C;
 $v = 1$ м/с; $d = 14$ г/кг с.п., висота шару 1 см.

Кінетика процесу сушіння листків та стебел м'яти в одиничному шарі описувалася на базі дослідних кривих сушіння як залежність безрозмірного вологовмісту W^* від часу:

$$W^* = \frac{W - W_p}{W_n - W_p} = f(\tau), \quad (3.3)$$

де W – поточний вологовміст, %;

W_n – початковий вологовміст, %;

W_p – рівноважний вологовміст, який визначається з умов гіротермічної рівноваги за ізотермами адсорбції (рис. 3.1), %;

τ – час сушіння, хв.

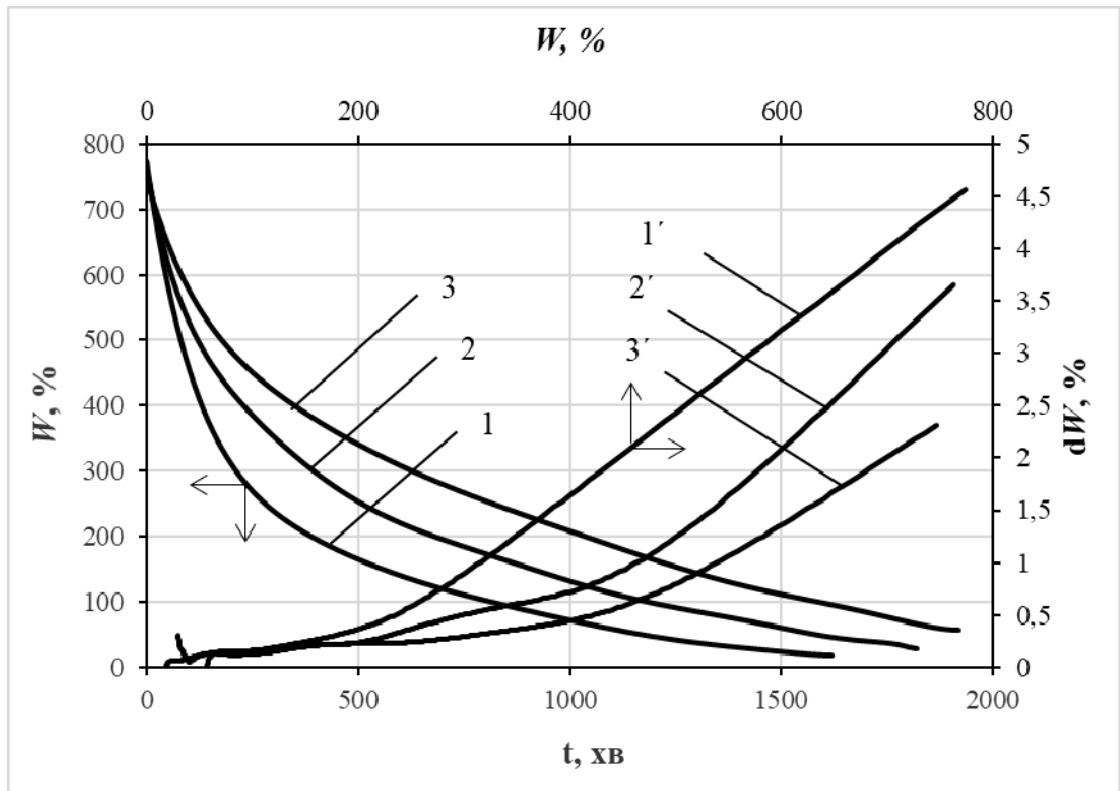


Рис. 3.6. Вплив температури сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння стебел м'яти перцевої.

Режимні параметри: 1, 1' – $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2, 2' – $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 3' – $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 $v = 1\text{ м/с}$; $d = 14\text{ г/кг с.п.}$, висота шару 1 см.

Для визначення часу зневоднення та узагальнення кривих сушіння використовується рівняння сушіння тонкого шару. Оскільки експериментальні криві сушіння м'яти перцевої (рис. 3.5, 3.6) не дають помітно виражених періодів постійної та лінійно спадаючої швидкості сушіння, то для апроксимації експериментальних кривих сушіння окремо листя та стебел м'яти перцевої використовувалася експоненціальна залежність, що враховує складний хід кривої швидкості сушіння і застосовується для колоїдних капілярно-пористих матеріалів рослинного походження [55]:

$$W^* = e^{-k\tau^n}, \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт сушіння; n – дослідна константа.

Величини коефіцієнтів рівнянь апроксимації кривих сушіння м'яти перцевої, що визначені при різних температурах теплоносія, наведені в таблиці 3.1. Для апроксимації експериментальних кривих використовувався пакет Origin. Адекватність рівнянь була визначена з використанням нелінійного коефіцієнта регресії (R^2) і середньоквадратичної погрішності (S).

Таблиця 3.1
Величини коефіцієнтів рівнянь апроксимації кривих сушіння

	Коефіцієнти	Температура, °C	R^2	S
М'яти перцевої (листя)	$W^* = e^{-k\tau^n}$ $k = 0,00785; n = 1,11221$ $k = 0,0264; n = 0,8836$ $k = 0,0145; n = 0,8836$	50	0,9997	0,00003
		40	0,9989	0,00008
		30	0,9865	0,00089
М'яти перцевої (стебла)	$W^* = e^{-k\tau^n}$ $k = 0,0630; n = 0,8836$ $k = 0,0321; n = 0,9489$ $k = 0,0334; n = 0,8068$	50	0,9995	0,00003
		40	0,9996	0,00003
		30	0,9998	0,00001

Порівняння експериментальних кривих кінетики сушіння одиничного шару листків (рис. 3.7) та стебел (рис. 3.8) м'яти перцевої з кривими, розрахованими за апроксимуючими рівняннями (табл. 3.1), показало задовільне співпадіння розрахункових даних з експериментальними.

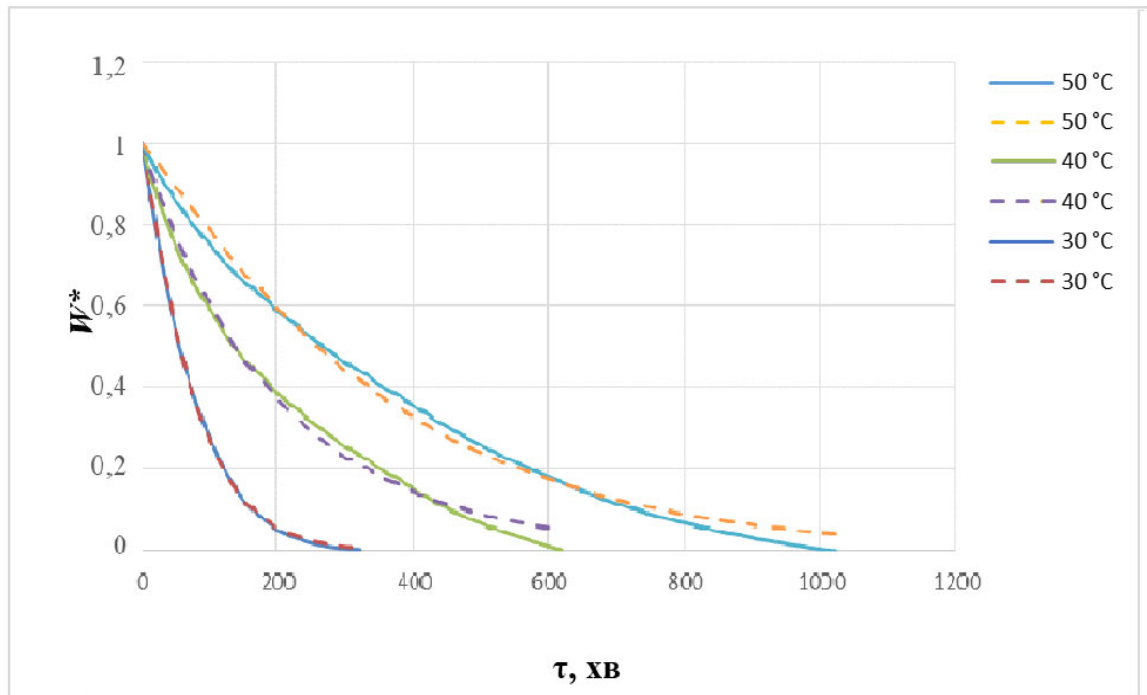


Рис. 3.7. Порівняння експериментальних кривих швидкості сушіння одиничного шару листя м'яти перцевої з кривими, розрахованими за апроксимуючими рівняннями, в залежності від температури теплоносія:

$$t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}; 2 - t = 40 \text{ } ^\circ\text{C}; 3 - t = 30 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$v = 1 \text{ м/с}; d = 14 \text{ г/кг с.п.}, \text{ висота шару } 1 \text{ см}$$

Відповідно до рівняння (3.2) тривалість процесу сушіння визначається як:

$$\tau = \left(\frac{1}{k} \ln \left(\frac{W - W_\delta}{W_i - W_p} \right) \right)^{1/n} \quad (3.5)$$

Запропонований напівемпіричний метод розрахунку кінетики сушіння є достатньо точним, тому що встановлена залежність для тривалості процесу сушіння (3.5) від вологовмісту матеріалу, що одержана безпосередньо з експериментальних кривих сушіння, враховує всі фактори, що пов'язані з властивостями пряно-ароматичної сировини як об'єкта сушіння і особливостями процесу конвективного зневоднення. Розбіжність результатів

розрахунку за одержаною формулою з експериментальними даними не перевищує 15%.

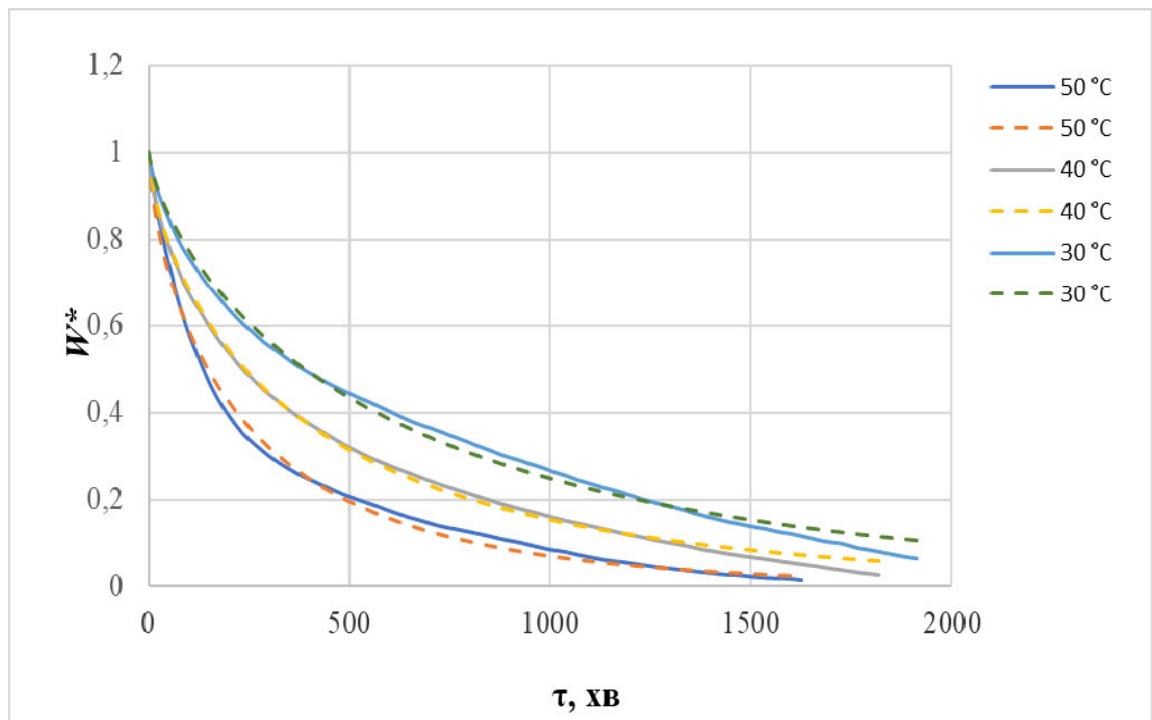


Рис. 3.8. Порівняння експериментальних кривих швидкості сушіння одиничного шару стебел м'яти перцевої з кривими, розрахованими за апроксимуючими рівняннями, в залежності від температури теплоносія:

$$t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}; 2 - t = 40 \text{ } ^\circ\text{C}; 3 - t = 30 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$v = 1 \text{ м/с}; d = 14 \text{ г/кг с.п.}, \text{ висота шару } 1 \text{ см}$$

Під час заготівлі листя м'яти перцевої підготовлені цілі рослини (стебла з листками) збирають у пучки, або подрібнюють на шматки по 7-10 см і підвішують під навісом або розкладають на рівній поверхні тонким шаром. Стебла відокремлюють від листя в уже висушеному вигляді.

На (рис. 3.9) наведені криві кінетики та швидкості сушіння м'яти перцевої (стебла з листками) в залежності від температури сушильного агента. Температура сушильного агента 30 °C відповідає денній температурі сушіння повітряно-тіньовим способом в період збирання м'яти перцевої. Проте впродовж доби температура повітря може суттєво коливатися. Так з

літературного огляду відомі дослідження повітряно-тіньового сушіння м'яги перцевої при температурі 20-32 °С, які тривали 10 днів [4]. Порівняння тривалості сушіння повітряно-тіньовим способом з зневодненням м'яги перцевої при температурі сушильного агента 30 °С, показало, що при тепловому сушінні відбувається значне скорочення часу в порівнянні з природнім процесом.

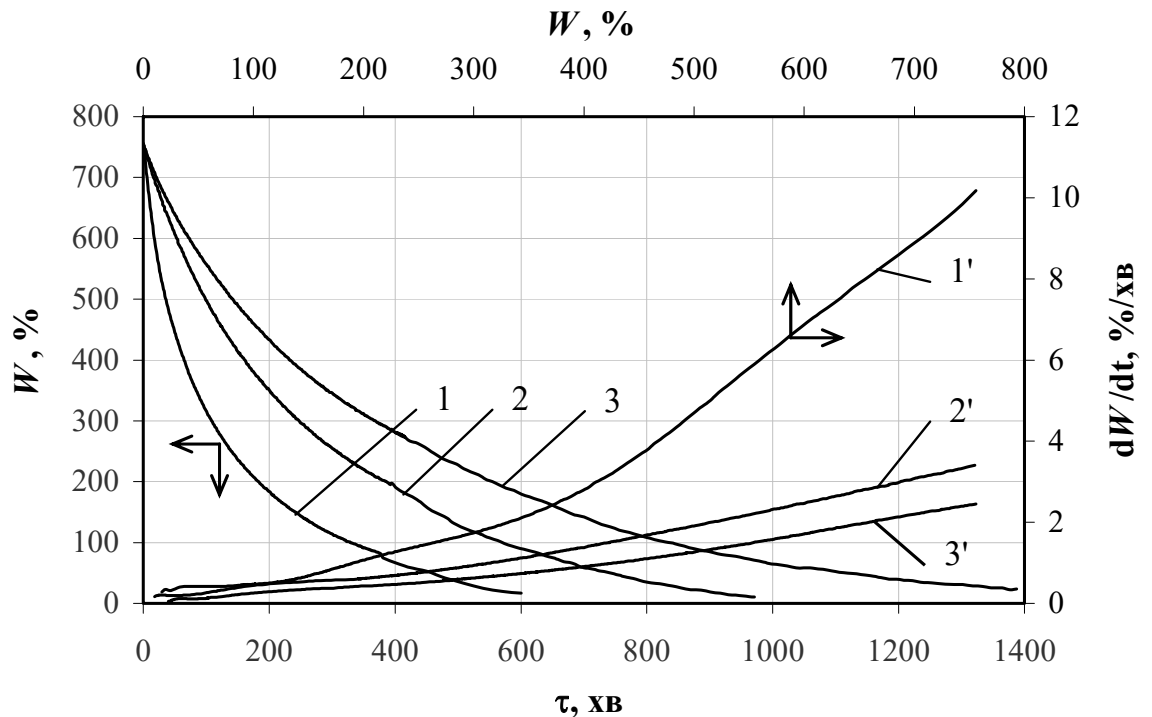


Рис. 3.9. Вплив температури сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яги перцевої (стебла з листками).

Режимні параметри: 1, 1' – $t = 50$ °С; 2, 2' – $t = 40$ °С; 3, 3' – $t = 30$ °С;
 $v = 2$ м/с; $d = 6$ г/кг с.п., висота шару 2-2,5 см.

Як видно з кривих сушіння м'яги перцевої (стебла з листками) (рис. 3.9), підвищення температури сушильного агента з 30 до 40 °С сприяє скороченню тривалості процесу сушіння до вологовмісту матеріалу 10 % з 1400 до 900 хв. (тобто у 1,6 рази), а збільшення температури з 40 до 50 °С приводить до зменшення тривалості сушіння з 900 до 600 хв. (у 1,5 рази). Швидкість сушіння м'яги в початковий момент при температурі сушильного агента 50 °С становить 10,17 %/хв, що в 4,3 рази вище, ніж при 30 °С [4].

Як видно (рис. 3.10), при збільшенні швидкості сушильного агента відбувається інтенсифікація процесу сушіння м'яти перцевої (стебла з листками). Збільшення швидкості повітряного потоку з 1 до 2 м/с за інших рівних умов ($t = 50^{\circ}\text{C}$, $d = 6$ г/кг с.п.) приводить до скорочення часу сушіння до вологовмісту матеріалу 10 % з 800 до 600 хв. на 1,33 рази і збільшує швидкість сушіння в початковий період в 1,9 рази. [4].

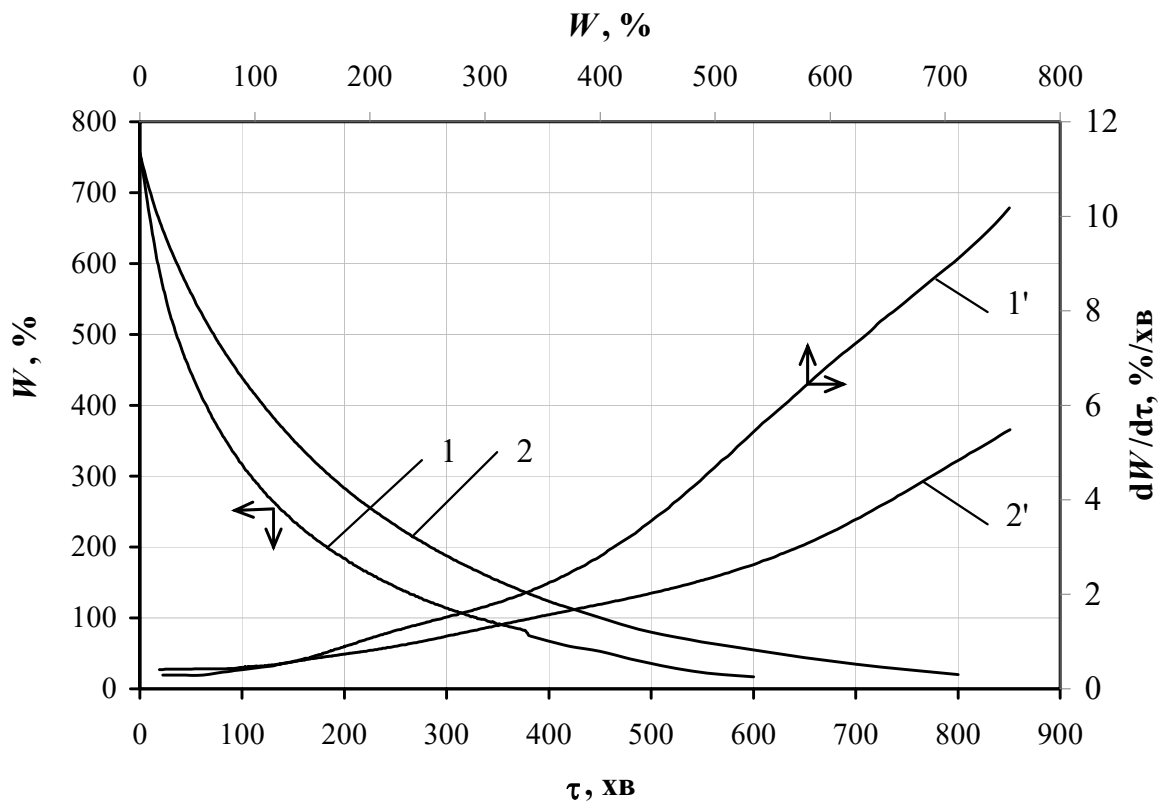


Рис. 3.10. Вплив швидкості сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти перцевої (стебла з листками).

Режимні параметри: 1, 1' – $v = 2$ м/с; 2, 2' – $v = 1$ м/с; $t = 50^{\circ}\text{C}$; $d = 6$ г/кг с.п., висота шару 2-2,5 см.

Під час низькотемпературного конвективного сушіння вплив вологовмісту сушильного агента на інтенсивність процесу стає суттєвим і значно залежить від тепловологісних параметрів атмосферного повітря. Так аналіз літніх температур і вологості повітря в Україні показав, що

вологівміст повітря коливається в діапазоні від 8 до 20 г/кг с.п. Експериментально встановлено, що під час сушіння м'яти перцевої (стебла з листками) при температурі сушильного агента 40 °С (рис. 3.11) підвищення вологовмісту сушильного агента з 6 до 13 г/кг с.п. приводить до збільшення часу сушіння до вологовмісту 10 % на 1,35 рази, а швидкість сушіння зменшується в 1,3 рази.

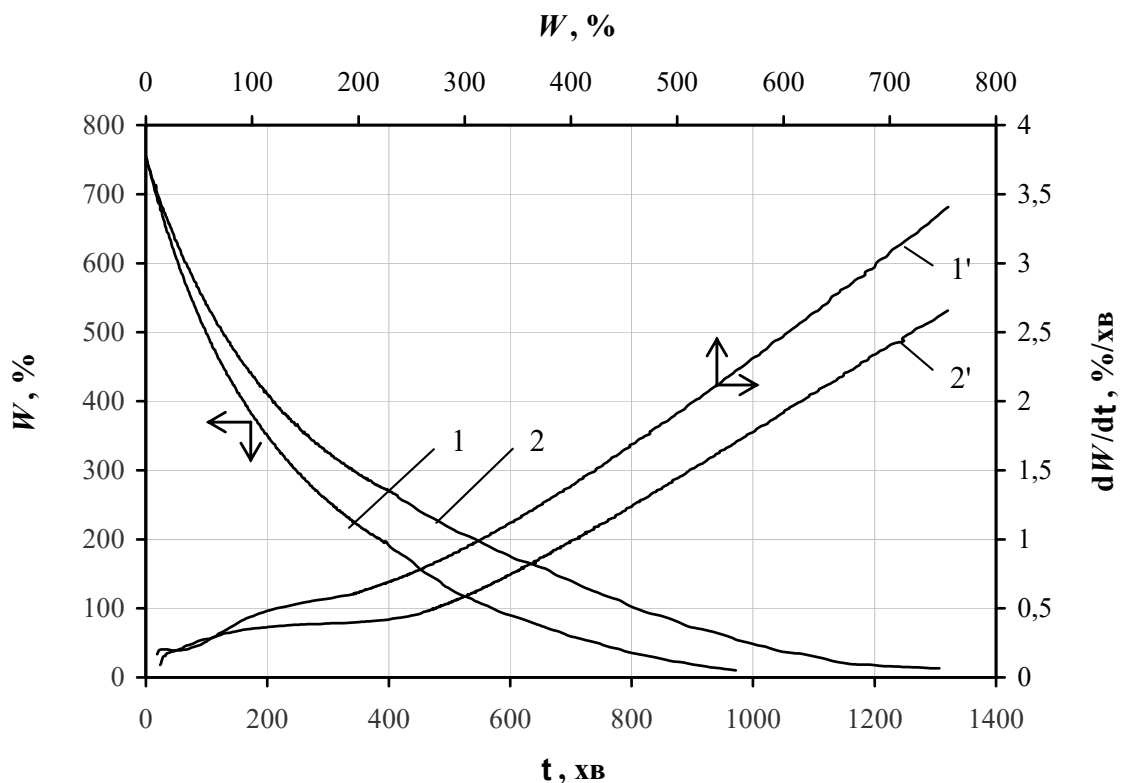


Рис. 3.11. Вплив вологовмісту сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти перцевої (стебла з листками).

Режимні параметри: 1, 1' – $d = 6$ г/кг с.п.; 2, 2' – 13 г/кг с.п.; $t = 40$ °С, $v = 2$ м/с, висота шару 2-2,5 см.

Зниження інтенсивності вологовидалення пов'язане зі зменшенням рушійної сили масообміну Δp , яка визначається різницею парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу p_n і в парогазовому потокові $p_{c.a.}$ (рис. 3.2). Так, при вологовмісті повітря 6 г/кг с.п. парціальний тиск водяної пари становить 8 мм рт.ст., а при 13 г/кг с.п. – 15 мм рт.ст. Таким чином, зниження

вологомісту сушильного агента на 7 г/кг с.п. приводить до збільшення середнього масообмінного напору в гігроскопічній бласті на 20 %, а в області адсорбційно-зв'язаної вологи – на 40 %. [4].

3.4 Обґрунтування шляхів інтенсифікації процесу зневоднення та розроблення енергоефективних режимів сушіння

Аналіз експериментальних даних показав, що сушіння м'яти перцевої – довготривалий процес, здійснення якого в конвективних сушарках є невідгідним, через їхню низьку ефективність, що пов'язана із значними втратами теплоти з відпрацьованим повітрям (більше 20 % в загальному тепловому балансі).

Традиційні методи інтенсифікації процесу сушіння шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента мають обмеження під час зневоднення пряно-ароматичних рослин через термочутливість ефірних олій. Так підвищення температури сушіння з 40 до 50 °С зменшує вміст ефірних олій в висушеній м'яті перцевій на 25 %, а збільшення швидкості сушильного агента з 1 м/с до 2 м/с – на 15 % [56]. Тому для збереження цінних речовин оптимальні режими сушіння м'яти перцевої повинні реалізовуватись в процесі низькотемпературного зневоднення при температурі, що не перевищує 40 °С, і швидкості сушіння 1 м/с.

Також у випадку сушіння пряно-ароматичної сировини не можливо використовувати такий метод інтенсифікації зневоднення термолабільних матеріалів як ступеневі режими зі змінюваною температурою сушильного агента. Цей метод широко використовується при сушінні паренхімних тканин плодів і дозволяє знизити енерговитрати на 20-25 % [16].

Так, не дивлячись на значну інтенсифікацію процесу сушіння при $t=50^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.7, 3.8, 3.9), неможливо використати цю температуру для ступеневого режиму сушіння м'яти перцевої. Це пов'язано з тим, що цінні ефірні олії знаходяться в залозах-трихомах на поверхні листа, і, як було

встановлено в підрозділі 3.2, при $t=42,5$ °C відбувається інтенсивне виділення летких речовин з рослини.

З аналізу залежності парціального тиску пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту та температури для м'яти перцевої (рис. 3.2) встановлено, що в міру зменшення вологовмісту матеріалу при зниженні його температури тиск пари води на поверхні зменшується. При цьому відбувається зменшення рушійної сили масообміну (Δp), яка визначається різницею парціального тиску пари води на поверхні матеріалу і в парогазовому потокові $p_{c.a.}$.

Єдиним шляхом інтенсифікації процесу низькотемпературного сушіння є збільшення масообмінного напору Δp шляхом примусового осушення сушильного агента. Таким чином процес зневоднення пряно-ароматичної сировини буде ефективним.

Для підтримки постійної величини масообмінного напору сушіння м'яти перцевої доцільно проводити за режимами зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента. На першій стадії сушіння, коли з матеріалу видаляється вільна волога, достатній невеликий ступінь осушення. На другій стадії (область гігроскопічного стану) ступінь осушення збільшується. На стадії досушування, при видаленні з м'яти перцевої адсорбційно-зв'язаної вологи, основним фактором, що обумовлює енерговитрати, є тривалість процесу. Для збільшення швидкості сушіння необхідно максимально збільшити ступінь осушення сушильного агента. Розроблені режими забезпечують оптимальні інтенсивність масообміну та енерговитрати впродовж всього процесу сушіння (табл. 3.2).

При виборі методів зневоднення пряно-ароматичної сировини та сушильного обладнання необхідно керуватися такими вимогами:

1. Температура сушіння не повина перевищувати гранично допустиму температуру нагріву м'яти перцевої, що становить 40 °C.

2. Сушіння повино відбуватися в замненому контурі для створення заданих умов процесу зневоднення, що не залежать від тепловологісних параметрів атмосферного повітря.

3. Можливість регулювання вологовмісту сушильного агента для реалізації режимів зі змінюваним ступенем його осушення.

4. Можливість уловлювання летких речовин.

5. Утилізація теплоти відпрацьованого сушильного агента.

Для реалізації цих вимог вибрано конденсаційний метод сушіння з застосуванням теплового насосу.

Таблиця 3.2

Режими сушіння м'яти при температурі сушильного агента 40 °С

Стадія	Умови	d , г/кг с.п.	Δp , мм рт.ст. м'ята
I	невеликий ступінь осушення сушильного агента	20...25	28...23
II	збільшення ступеня осушення сушильного агента	14...20	24...28
III	максимально можливий ступінь осушення сушильного агента	6...14	22...24

Висновки до розділу 3

1. Тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена при температурі 30, 40 та 50 °С досліджені адсорбційні характеристики м'яти перцевої та побудовані ізотерми адсорбції.

2. Для зменшення втрат ефірної олії та для запобігання дії реакцій неферментативного потемніння м'яту необхідно сушити до залишкового вологовмісту, що нижчий за 10 %.

3. На підставі ізотерм адсорбції для гігроскопічної області (зона зв'язаної вологи) одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні м'яти перцевої від вологовмісту і температури в діапазоні $u = 0,1 \dots 0,9$ кг/кг с.м. і $t = 30 \dots 50$ °С, що дозволяє встановити зв'язок між тепловологісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу та визначити масообмінний напір Δp .

4. За умов сорбційної рівноваги визначені тепловологісні параметри сушильного агента при досушуванні м'яти до залишкового вологовмісту 10 %. Встановлено, що під час видалення зв'язаної вологи вологовміст сушильного агента не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

5. Визначені величини чистої ізостеричної теплоти адсорбції, за якими оцінюються мінімальні витрати енергії необхідні для процесу сушіння. Показано, що при видаленні адсорбційно-зв'язаної вологи питома теплота випаровування води з листя м'яти збільшується на 29 % в порівнянні з теплотою паротворення.

6. Експериментально калориметричним методом одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурах 40 і 50 °С. Виявлено вплив летких речовин ефірної олії м'яти перцевої на теплоту випаровування.

7. Встановлено, що вибір температури сушіння пряно-ароматичних рослин в першу чергу визначається термочутливістю ефірних олій. Дослідження впливу температури сушіння на видалення летких ароматичних сполук з листя м'яти перцевої показало, що для запобігання значних втрат якості гранично допустима температура матеріалу під час зневоднення не повинна перевищувати температуру плавлення ментолу 42,5 °С.

8. Експериментально досліджений вплив тепловологісних параметрів сушильного агента на кінетику процесу сушіння м'яти перцевої.

Виявлено, що інтенсифікація процесу зневоднення відбувається при підвищенні температури, збільшенні швидкості та зниженні вологовмісту сушильного агента.

9. За аналізом кривих кінетики сушіння та кривих швидкості сушіння з урахуванням гранично допустимої температури нагріву матеріалу визначені оптимальні режими сушіння м'яти перцевої, що реалізуються таким чином, щоб температура матеріалу не перевищувала $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$, $d=6\text{ г/кг с.п.}$ та $\delta=1\text{ см}$.

10. Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння м'яти перцевої показали, що під час низькотемпературного зневоднення вологовміст сушильного агента суттєво впливає на швидкість процесу. Зниження вологовмісту сушильного агента шляхом примусового осушення дозволяє на 25 % скоротити тривалість сушіння.

11. На основі експериментальних досліджень одержані емпіричні рівняння кривих сушіння та швидкості сушіння листків та стебел м'яти перцевої, а також виведена залежність для визначення тривалості процесу зневоднення.

4 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ ПРЯНО-АРОМАТИЧНОЇ СИРОВИНИ

4.1 Аналіз технологічних схем включення теплових насосів у теплогенеруючі системи конвективних сушарок

Для підвищення енергоефективності процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини запропоновано використовувати конденсаційний метод сушіння з застосуванням теплового насоса (ТН).

Інтеграція ТН в цикл конвективної сушарки дозволяє реалізувати висунуті за результатами експериментальних досліджень (розділ 3) вимоги до сушіння м'яти перцевої. Можливість примусового осушення повітря дозволяє створити необхідні тепловологісні параметри сушильного агента незалежно від умов навколишнього середовища (стану атмосферного повітря). Здатність теплового насоса знижувати вологовміст сушильного агента під час низькотемпературного сушіння сприяє інтенсифікації вологовидалення за рахунок підвищення масообмінного напору між теплоносієм і матеріалом [57].

Під час роботи теплонасосної сушарки за замкненим циклом відпрацьоване вологе повітря не викидається в навколишнє середовище. Волога, що вилучається з матеріалу, конденсується на холодній поверхні випарника ТН і вилучається у скрапленому вигляді. При цьому теплота конденсації утилізується і повертається в сушильний цикл на більш високому температурному рівні, що знижує питомі енерговитрати. Таким чином, в ТН сушарці можливо створити керовані умови процесу зневоднення, а саме регулювати температуру, швидкість та вологовміст сушильного агента.

Схематично конвективна сушарка з теплонасосною системою підготовки теплоносія та процес сушіння в $H-d$ діаграмі вологого повітря наведені на рис. 4.1. Цикл сушіння за замкненим контуром здійснюється

таким чином. Сушильний агент нагрівається в конденсаторі ТН 3 (точка a на $H-d$ діаграмі). Далі сушильний агент надходить до сушильної камери 1, проходить через матеріал, що висушується, охолоджується і адіабатично зволожується (процес $a-b$). Вологий сушильний агент станом b надходить до випарника ТН 5, де охолоджується (процес $b-c-d$) до температури роси (стан d). При цьому волога, що знаходиться в сушильному агенті, конденсується та стікає до збірника конденсату. Далі охолоджений осушений сушильний агент надходить до конденсатора ТН 3, де нагрівається (процес $d-a$). Нагрітий сушильний агент повертається до сушильної камери 1, і цикл повторюється.

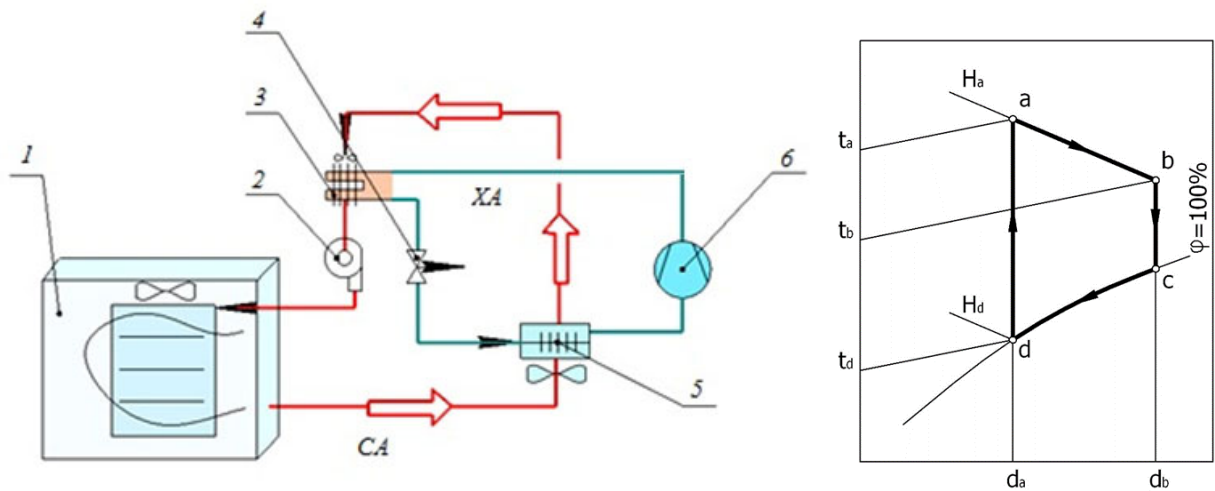


Рис. 4.1 – Теплонасосна сушарка і процес сушіння в $H-d$ діаграмі

1 – сушильна камера; 2 – вентилятор; 3 – конденсатор;

4 – дросель; 5 – випарник; 6 – компресор;

CA – контур сушильного агента; XA – контур холодоагента

Можливість утилізувати теплоту конденсації суттєво впливає на енергоспоживання сушарки – витрати енергії на вилучення вологи в ТН сушарці нижчі в порівнянні з традиційними конвективними сушарками.

Енергоефективність сушильної установки визначається витратами енергії на видалення 1 кг вологи з висушуваного матеріалу. Розглянемо ідеальну (H_a-H_b) конвективну сушарку з однократним проходженням теплоносія (процес $m-a-b$ в $H-d$ діаграмі рис. 4.1). В цьому випадку питомі витрати теплоти на процес сушіння визначаються за рівнянням [58]:

$$q = \frac{H_a - H_m}{d_b - d_a} \quad (4.1)$$

Споживана потужність компресора теплового насоса для теплонасосної конденсаційної сушарки (процес $a-b-c-d$ в $H-d$ діаграмі, рис. 4.1) складає [60]:

$$Q_{KM} = \frac{H_a - H_d}{COP \cdot (d_b - d_a)}, \quad (4.2)$$

де $COP = 0,45 \cdot \left(\frac{t_a + 273}{t_a - t_d} \right)$ – усереднена величина коефіцієнта перетворення для дійсного циклу парокомпресійних теплових насосів, яка складає 0,45...0,50 циклу Карно.

Для розрахунку енергетичних витрат задаються параметрами сушильного агента в ключових точках процесу:

t_m – температура атмосферного повітря;

H_m – ентальпія повітря до сушарки;

t_a – температура сушильного агента на вході до сушильної камери;

d_a – вологовміст повітря на вході до сушильної камери;

H_a – ентальпія сушильного агента на вході до сушильної камери;

t_b – температура сушильного агента на виході з сушильної камери;

d_b – вологовміст сушильного агента на виході з сушильної камери;

t_d – температура охолодження сушильного агента в випарнику ТН;

H_d – ентальпія осушеного сушильного агента після випарника ТН.

При визначенні енерговитрат були розглянуті однакові як для конвективної так і для ТН сушарки режими зневоднення з такими тепловологісними параметрами процесу: $t_m = 30$ °С; $d_a = 20$ г/кг с.п.; $t_a = 40$ °С; $t_b = 35$ °С; $t_d = 23$ °С.

Порівняння отриманих питомих енерговитрат показало, що питомі енерговитрати при теплонасосному сушінні (2000 кДж/кг) в 2,7 рази менші

ніж при конвективному (5500 кДж/кг) (рис. 4.2). Для заданих параметрів сушіння коефіцієнт перетворення $COP = 4,25$.

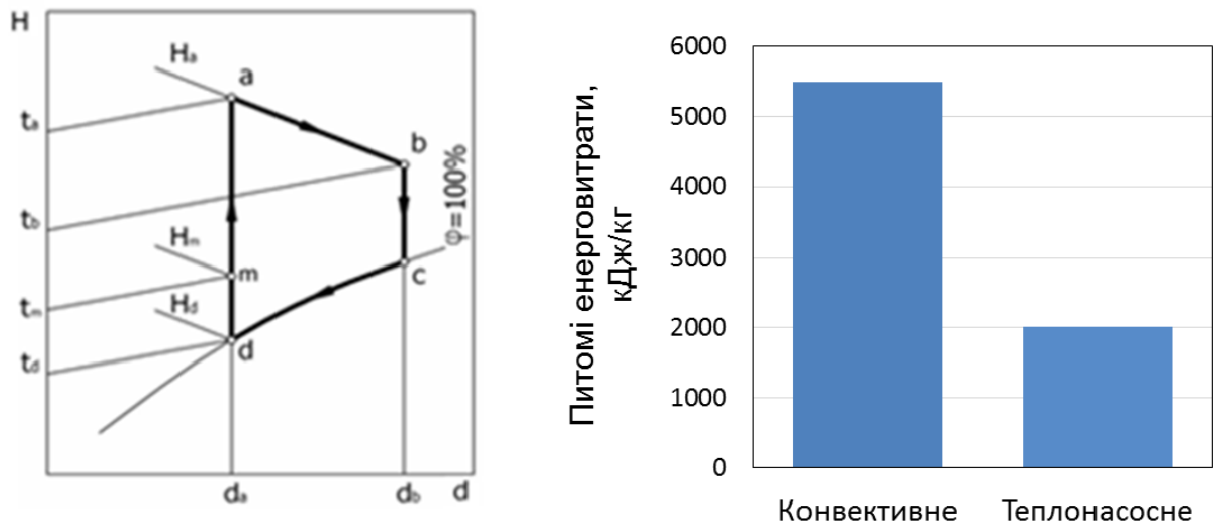


Рисунок 4.2 – Енерговитрати на процес сушіння

Технологія сушіння з тепловим насосом забезпечує зниження питомих енерговитрат шляхом керованого осушення теплоносія.

В попередніх дослідженнях [57] процесу конденсаційного сушіння з застосуванням теплонасосного циклу, встановлено, що величина поточних енерговитрат на зневоднення значною мірою залежить від вологовмісту сушильного агента і температурного режиму його осушення: чим вищий вологовміст і нижча температура зневоднення, тим менші питомі енерговитрати на видалення з нього вологи. В роботі наведені результати аналітичних досліджень з яких слідує, що вибір раціональних режимів роботи ТН дозволяє знизити в декілька разів питомі витрати енергії на вилучення вологи в процесах конденсаційного сушіння.

В дослідженні [59, 60] були розглянуті три схеми осушення теплоносія в ТН сушарці (рис. 4.3):

1) з осушенням всього носія (рис. 4.3, а). За цією схемою весь потік зволоженого теплоносія охолоджується у випарнику ТН (процес $b-c-d$) до температури точки роси (стан d). Осушений теплоносій надходить до конденсатора ТН, де нагрівається (процес $d-a$). Нагрітий теплоносій

надходить до сушильної камери, де проходить над матеріалом, що висушується, зволожується і охолоджується (процес $a-b$);

2) з осушенням частини теплоносія (рис. 4.3, б). Зволожений в сушильній камері теплоносій (процес $a-b$) розділяється на два потоки: один потік охолоджується у випарнику ТН (процес $b-c-d$), після чого змішується з другим вологим потоком (процеси $b-e$ і $d-e$), і в стані e надходить до конденсатора ТН на нагрівання (процес $e-a$);

3) з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду (рис. 4.3, в). Після адіабатичного зволоження теплоносія (процес $a-b$) в сушарці одна частина його охолоджується до стану d , аналогічно попередній схемі. Але при цьому потік, що надходить на охолодження, вступає в теплообмін в рекуператорі теплоти 5 з холодним осушеним потоком, що йде з випарника 1 (процеси $b-b'$, $d-d'$). Далі осушений потік змішується з частиною вологого теплоносія (процеси $d'-e$, $b-e$) і в стані e подається до конденсатора ТН 3 на нагрівання (процес $e-a$).

Як видно з $H-d$ діаграми стану сушильного агента, для всіх схем незалежно від режиму видалення вологи досягається однаковий ступінь осушення теплоносія. Аналіз наведений в роботі [58] розрахункових величин питомих енерговитрат на осушення теплоносія показав, що витрати енергії на привод ТН для даних схем будуть значно відрізнятися [61,62].

Для цих схем були розраховані питомі енерговитрати на видалення вологи для тепловологісних параметрів сушильного агента, які є оптимальними для зневоднення м'яти перцевої (температура 40 °С, вологовміст від 6 до 20 г/кг с.п.): для схеми а енерговитрати склали від 0,75 до 0,5 кВт*год/кг, для схеми б - від 0,62 до 0,21 кВт*год/кг, для схеми в - від 0,5 до 0,2 кВт*год/кг. За схемою в енерговитрати в 1,5...1,2 рази нижчі ніж за схемами а і б.

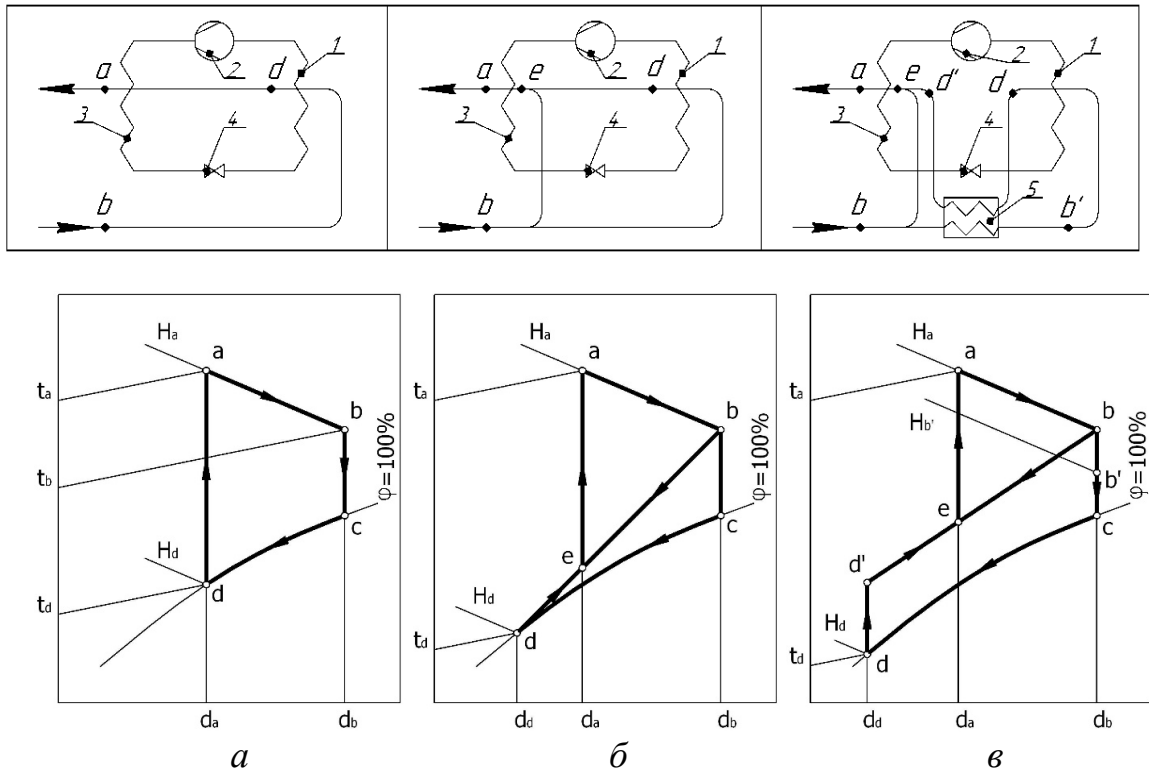


Рис. 4.3 – Схеми зневоднення теплоносія в теплонасосних сушарках і процес обробки повітря в $H-d$ діаграмі з осушенням усього теплоносія (а), з осушенням частини теплоносія (б), з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду (в)

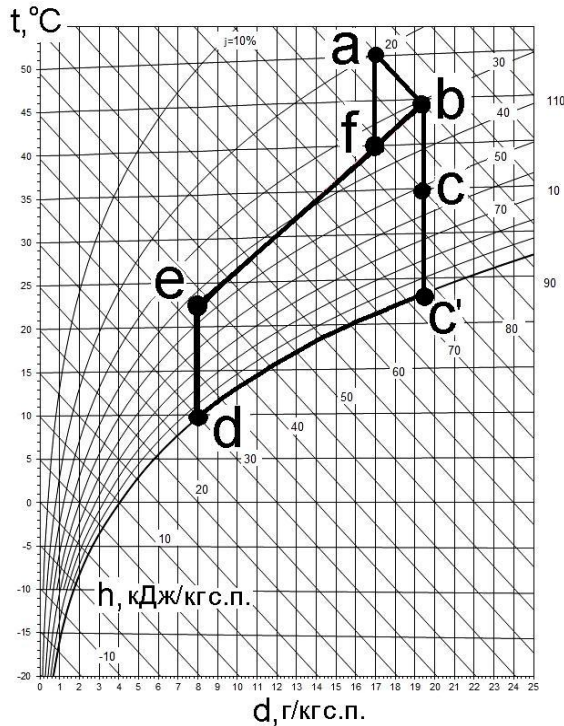
1 – випарник; 2 – компресор; 3 – конденсатор;
4 – дросель; 5 – рекуперативний теплообмінник.

Таким чином, найбільш ефективним з точки зору витрат енергії на осушення теплоносія є процес його зневоднення шляхом глибокого охолодження частини теплоносія з подальшою рекуперацією холоду (схема в).

4.2 Розрахунок процесу теплонасосного сушіння в $H-d$ діаграмі вологого повітря

Для визначення оптимальних за енерговитратами показників процесу сушіння в теплонасосній сушарці розроблений алгоритм розрахунку в $H-d$ діаграмі процесу зневоднення теплоносія для схеми в (з осушенням частини

теплоносія і рекуперацією холоду). Процес ТН сушіння для схеми *в* в *H-d* діаграмі показано на рис. 4.4 [59, 63, 64].



a-b – адиабатичне зволоження;
b-c – охолодження в рекуператорі;
c-d – охолодження та осушення в випарнику теплового насоса;
d-e – нагрівання в рекуператорі;
e-f + b-f – змішування;
f-a – нагрівання в конденсаторі теплового насоса

Рис. 4.4 – Процес теплонасосного сушіння в *H-d* діаграмі.

Як вихідні дані для розрахунку задавалися початкова температура теплоносія t_a на вході сушильної камери та температура вологого теплоносія t_b на виході з сушильної камери, а також початковий (на вході до сушарки) вологовміст теплоносія d_a , температура охолодження теплоносія t_b в випарнику ТН, витрата теплоносія G_a , ефективність рекуператора E .

Параметри теплоносія в інших точках процесу зневоднення та енерговитрати в ТН циклі розраховуються за алгоритмом, що наведений нижче.

Параметри, що розраховуються:

t_c – температура вологого теплоносія після рекуператора;

t_e – температура осушеного теплоносія після рекуператора;

t_f – температура теплоносія після змішування;

d_b – вологовміст теплоносія на виході з сушарки;

d_d – вологовміст осушеного теплоносія;

- d_f – вологовміст теплоносія після змішування;
 H_a – ентальпія теплоносія на вході до сушарки;
 H_c – ентальпія вологого теплоносія після рекуператора;
 H_d – ентальпія осушеного теплоносія;
 H_e – ентальпія осушеного теплоносія після рекуператора;
 H_f – ентальпія теплоносія після змішування;
 G_{a-b} – витрата теплоносія через сушильну камеру, кг с.п.;
 G_{b-c} – частка осушуваного теплоносія, кг с.п.;
 Q_o – холодопродуктивність теплового насоса;
 Q_k – теплопродуктивність теплового насоса;
 ΔQ_k – надлишок теплопродуктивності теплового насоса;
 N – споживана потужність теплового насоса;
 q – питомі енерговитрати на видалення вологи.

Алгоритм визначення параметрів теплоносія в ключових точках процесу (рис.4.4) [61]:

Точка А.

t_a – задано;

d_a – задано, г/кг с.п.;

G_{a-b} – задано, кг с.п.;

$$H_a = 1,006 \cdot t_a + (2501 + 1,85 \cdot t_a) \cdot \frac{d_a}{1000}, \text{ кДж/кг с.п.}$$

$$G_{a-b} = 1 \text{ кг с.п.}$$

Точка В.

t_b – задано

$$d_b = \frac{1000 \cdot (H_a - 1,006 \cdot t_b)}{2501 + 1,85 \cdot t_b}, \text{ г/кг с.п.};$$

$$H_b = H_a$$

Точка С.

$$G_{b-c} = G_{a-b} \cdot \frac{d_b - d_f}{d_b - d_e}$$

Якщо $H_b - (H_e - H_d) - 3,3776 \cdot d_b - 8,1529 \geq 0$, тоді:

$$t_c = \frac{1000 \cdot H_c - 2501 \cdot d_c}{1006 + 1,85 \cdot d_c}$$

$$d_c = d_b$$

$$H_c = H_b - (H_e - H_d)$$

якщо $H_b - (H_e - H_d) - 3,3776 \cdot d_b - 8,1529 \leq 0$, тоді:

$$t_c = 18,128 \cdot \ln(H_c) - 53,562$$

$$d_c = 0,1594 \cdot H_c^{1,1164}$$

$$H_c = H_b - (H_e - H_d)$$

Точка D.

t_d – задано

$$d_d = 3,8474 \cdot e^{0,0679 \cdot t_d}, \text{ г/кг с.п.}$$

$$H_d = 1,006 \cdot t_d + (2501 + 1,85 \cdot t_d) \cdot \frac{d_d}{1000}, \text{ кДж/кг с.п.}$$

Точка E.

$$t_e = t_d + E \cdot (t_b - t_d)$$

$$d_e = d_d$$

$$H_e = 1,006 \cdot t_e + (2501 + 1,85 \cdot t_e) \cdot \frac{d_e}{1000}, \text{ кДж/кг с.п.}$$

Точка F.

$$t_f = \frac{1000 \cdot H_f - 2501 \cdot d_f}{1006 + 1,85 \cdot d_f}$$

$$d_f = d_a$$

$$H_f = \frac{H_e \cdot (d_b - d_f) + H_b \cdot (d_f - d_e)}{d_b - d_e}$$

Енергетичні показники теплонасосного циклу розраховуються за наступними формулами:

Холодопродуктивність теплового насоса

$$Q_o = G_{b-c} \cdot (H_c - H_d) = G_{a-b} \cdot \frac{d_b - d_f}{d_b - d_e} \cdot (H_c - H_d), \text{ кДж.} \quad (5.4)$$

Споживана потужність теплового насоса

$$N = \frac{Q_o}{0,45 \cdot \left(\frac{t_a + 273}{t_a - t_d} \right) - 1}, \text{ кДж.} \quad (5.5)$$

Теплопродуктивність теплового насоса

$$Q_{\dot{e}} = Q_o + N, \text{ кДж.} \quad (5.6)$$

Надлишкова теплопродуктивність теплового насоса

$$\Delta Q_{\dot{e}} = Q_{\dot{e}} - G_{a-b} \cdot (I_a - H_f), \text{ кДж.} \quad (5.7)$$

Енерговитрати на видалення вологи :

$$q = \frac{1000 \cdot N}{G_{b-c} \cdot (d_c - d_d)}, \text{ кДж/кг.} \quad (5.8)$$

Слід зазначити, що використана в розрахунках узагальнена формула для коефіцієнта перетворення COP дозволяє досить точно визначити величину питомих енерговитрат на видалення вологи, що є достатнім для аналітичних досліджень.

4.3 Дослідження впливу тепловологісних параметрів сушильного агента на енергетичні показники роботи теплового насосу

За вище наведеним алгоритмом були визначені вологовміст, ентальпія, абсолютна та відносна вологість повітря в ключових точках циклу. За цими параметрами були розраховані енерговитрати в теплонасосному циклі при різних температурах сушіння, ступенях осушення теплоносія, а також енергоефективностях рекуперативного теплообмінника.

Найбільший вплив на величину енерговитрат q має ступінь осушення теплоносія (рис. 4.5). Як видно з графіків, чим менший вологовміст теплоносія, тим більші енерговитрати на видалення з нього вологи. Це пояснюється тим, що зі зниженням вологовмісту збільшується доля енергії,

що непродуктивно витрачається на охолодження і нагрівання маси повітря. При осушенні теплоносія до вологовмісту менше ніж $d = 14$ г/кг с.п. витрати енергії значно зростають.

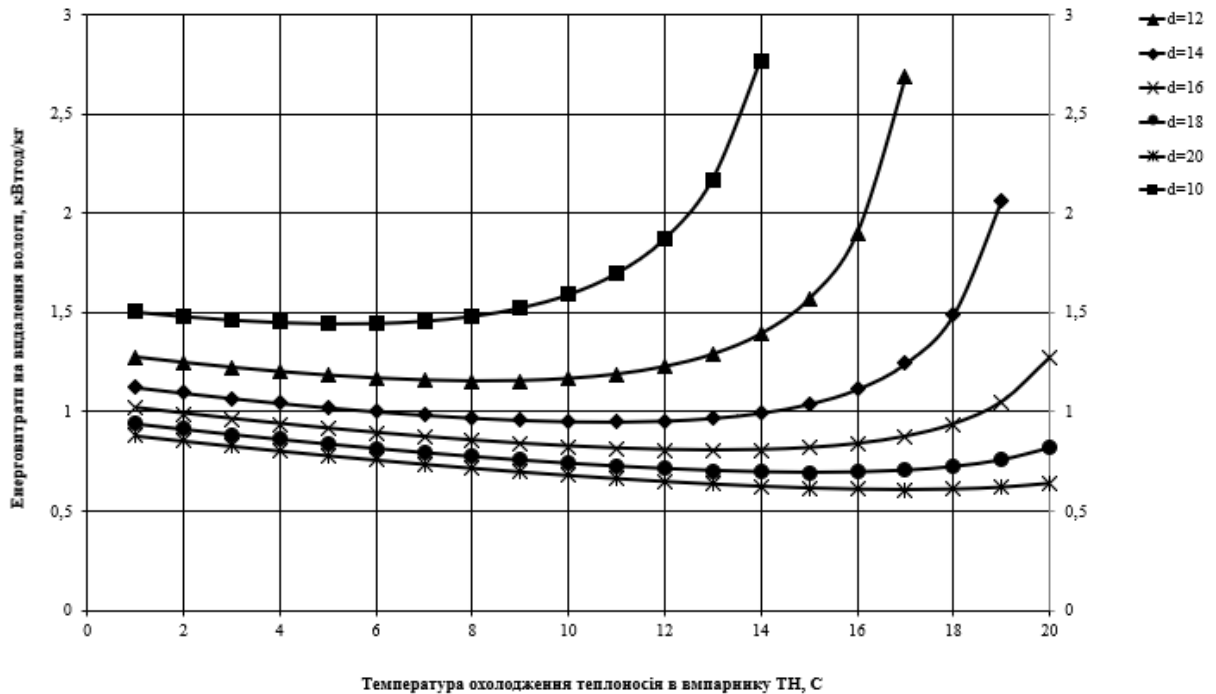


Рис. 4.5 – Вплив вологовмісту осушувача на енерговитрати процесу видалення вологи

Розрахунки показали, що на зменшення поточних енерговитрат впливає зниження температури теплоносія (рис. 4.6). Чим вища температура, тим більші енерговитрати. Так зниження температури з 55 до 40 °С дозволяє зменшити енерговитрати практично в 2 рази. Як видно з графіків, зменшення вологовмісту призводить до зростання енерговитрат. Так при зниженні вологовмісту з 20 до 6 г/кг с.п., енерговитрати збільшуються в 1,7 рази.

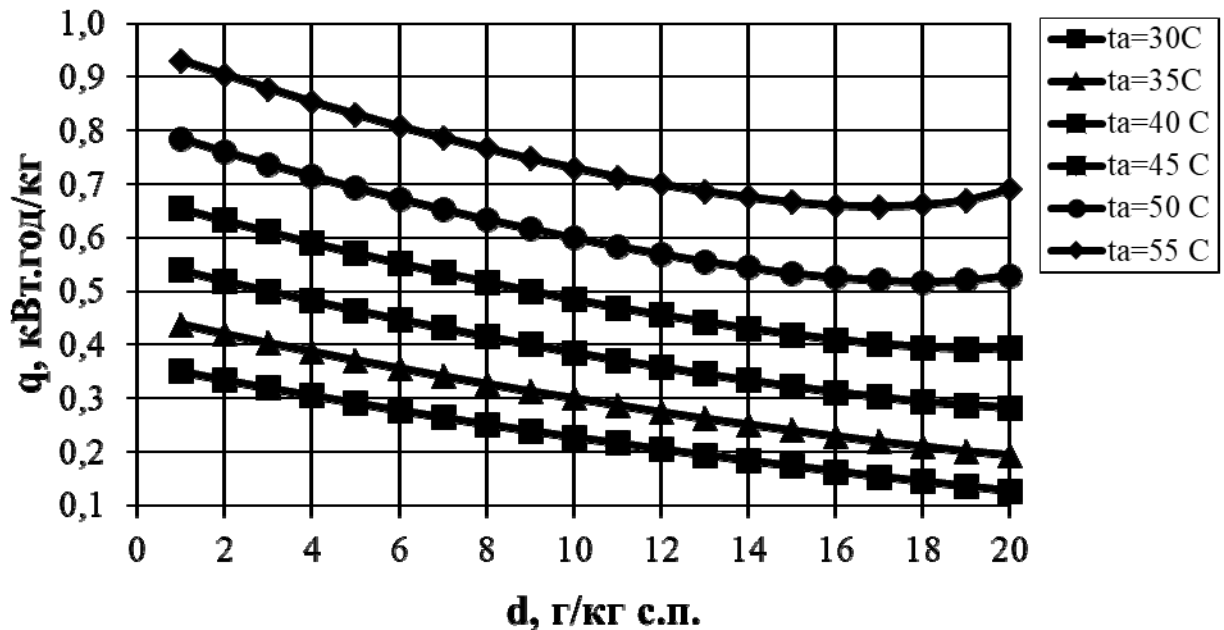


Рис. 4.6 – Залежність енерговитрат на видалення вологи від температури сушіння (при ефективності рекуператора $E=0$)

Аналіз досліджень з кінетики сушіння м'яти перцевої (див. підрозділ 3.3) показав, що при зниженні вологовмісту сушильного агента тривалість зневоднення значно скорочується, проте згідно до рис. 4.6 енерговитрати на процес збільшуються. Керуючись даними з гіротермічної рівноваги (див підр. 3.1) доцільно проводити сушіння м'яти за ступеневим режимом зі змінюваним ступенем осушування теплоносія. На першому етапі підтримуються високі значення вологовмісту сушильного агента d більше 20 г/кг с.п., при цьому енерговитрати q будуть 0,27 кВт год/кг видаленої вологи і менше. На другому етапі теплоносій осушується до $d = 14...20$ г/кг с.п. при енерговитратах $q - 0,33...0,27$ кВт год/кг. На третьому етапі при видаленні адсорбційно-зв'язаної вологи для створення необхідного теплообмінного напору (рис. 3.2) вологовміст осушеного теплоносія необхідно підтримувати на рівні $d = 6...14$ г/кг с.п.. Енерговитрати при цьому можуть сягати 0,45 кВт год/кг.

Оскільки для м'яти перцевої температура сушіння обмежена 40 °С, оптимізацію процесу за енерговитратами доцільно здійснювати шляхом керування вологовмістом теплоносія впродовж всього процесу сушіння. Тому сушіння м'яти перцевої рекомендується проводити за енергозберігаючими ступеневими режимами зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента.

Ефективним рішенням, що дозволяє знизити поточні енерговитрати при теплонасосному сушінні та зменшити встановлену потужність теплонасосного агрегату, є осушення теплоносія за схемою в (рис 4.3) з рекуперацією холоду за допомогою теплообмінника «повітря-повітря». Зменшення енерговитрат при цьому відбувається за рахунок того, що відпрацьований теплоносій, перед тим як надійти на охолодження до випарника теплового насоса, частково охолоджується в результаті теплообміну з вже охолодженим в випарнику теплоносієм. Як видно з графіків на рис. 4.7, 4.8, застосування рекуперативного теплообмінника дозволяє в залежності від його ефективності в 1,5...2 рази знизити витрати енергії на процес сушіння.

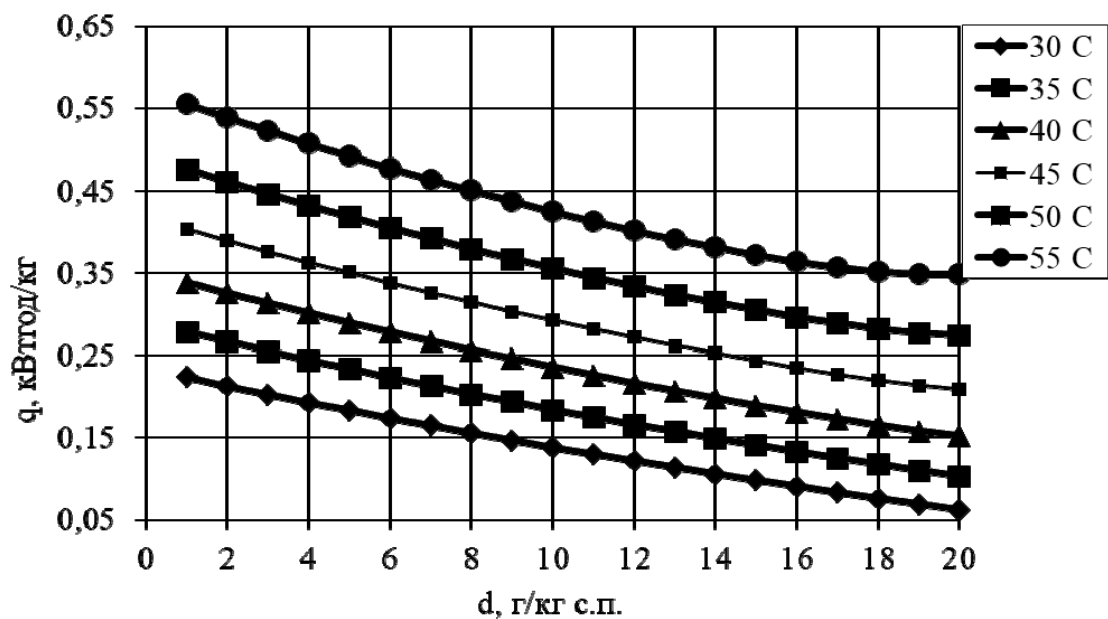
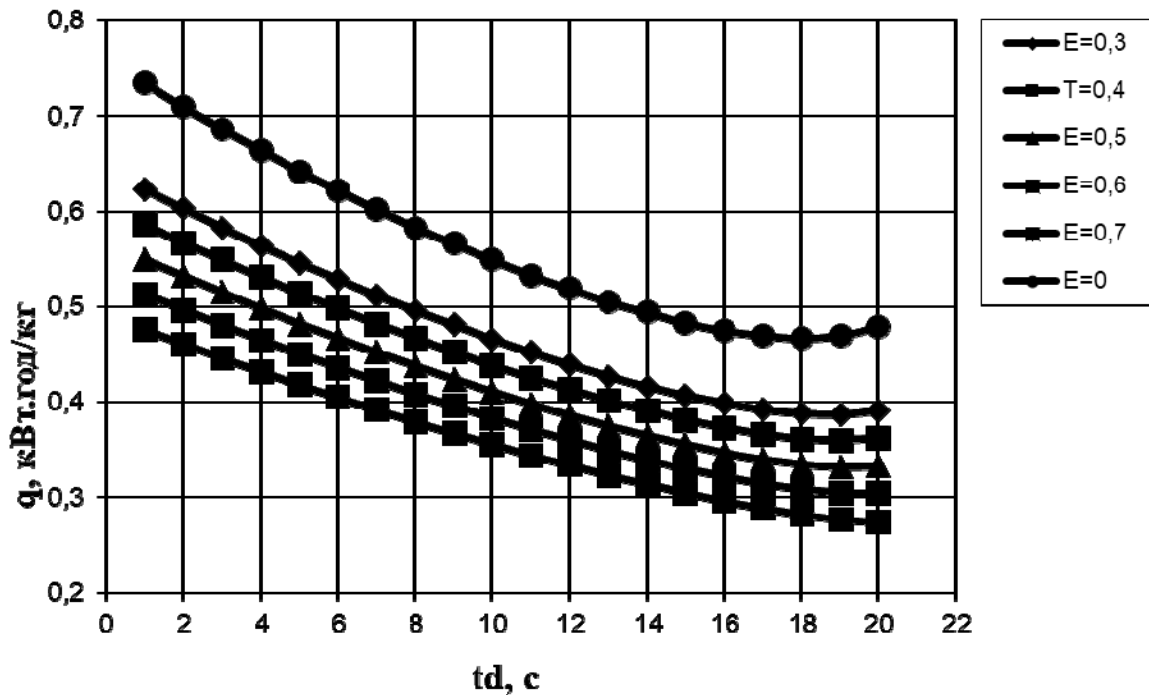


Рис. 4.7 – Вплив температури сушіння на енерговитрати процесу видалення вологи (при ефективності рекуператора $E = 0,7$).



Рису. 4.8 – Залежність енерговитрат на видалення вологи від ефективності рекуператора E (при $t_a = 50\text{ }^\circ\text{C}$ і $d_a = 20\text{ г/кг с.п.}$).

Висновки до розділу 4

1. Обґрунтована доцільність використання ТН при низькотемпературному сушінні пряно-ароматичної сировини, а також для створення контрольованого процесу зневоднення шляхом регулювання вологовмісту сушильного агента.

2. Використання ТН в процесах конвективного сушіння пряно-ароматичної сировини дозволяє за рахунок утилізації теплоти конденсації знизити питомі витрати енергії. Показано, що питомі енерговитрати при теплонасосному сушінні в 2,7 рази менші ніж при конвективному при $\text{COP}=4,25$.

3. Розглянуті та проаналізовані різні режими осушення теплоносія в ТН. За розрахунковими величинами енерговитрат на видалення вологи показано, що найбільш ефективним є процес осушення теплоносія шляхом глибокого охолодження його частини з подальшою рекуперацією холоду.

4. Для оптимізації енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння пряно-ароматичної сировини розроблена методика розрахунку осушення теплоносія в H-d діаграмі та розраховані тепловологісні параметри сушильного агента в ключових точках процесу.

5. Встановлено, що найбільший вплив на енерговитрати в процесі теплонасосного сушіння має ступінь осушення теплоносія: з підвищенням ступення осушення витрати енергії на видалення вологи збільшуються. При осушенні глибше за $d=14$ г/кг с.п. енерговитрати різко зростають.

6. Показано, що величина енерговитрат на зневоднення зростає з підвищенням температури сушіння. Чим вища температура тим більші енерговитрати. Так зниження температури з 55 до 40 °C дозволяє зменшити енерговитрати практично в 2 рази.

7. Показано, що величина енерговитрат на зневоднення зростає з підвищенням вологовмісту сушіння. Зменшення вологовмісту призводить до зростання енерговитрат. Так при зниженні вологовмісту з 20 до 6, енерговитрати збільшуються в 1,7 рази.

8. Застосування рекуперативного теплообмінника дозволяє в залежності від його ефективності в 1,5...2 рази зменшити енерговитрати на процес сушіння.

9. На основі проведених розрахунків енерговитрат теплового насоса в залежності від режиму осушення теплоносія встановлено, що при раціональних режимах роботи теплового насоса може бути досягнуто зниження питомих енерговитрат на видалення вологи у 1,3-1,5 рази.

10. За даними з гігротермічної рівноваги і кінетики сушіння м'яти перцевої та підставі розрахункових енерговитрат теплового насоса на процес зневоднення розроблені ступеневі режими теплонасосного сушіння зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента, що забезпечують мінімальні загальні витрати енергії.

5 РОЗРОБЛЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ КОНВЕКТИВНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СУШАРКИ

5.1 Вимоги до теплонасосної сушарки

Під час теплонасосного сушіння в замкненому контурі можливо реалізувати складний алгоритм управління процесом зневоднення. Щоб уникнути перегріву матеріалу і для оптимізації енерговитрат теплонасосний агрегат на різних стадіях сушіння повинен працювати за перемінними режимами – протягом циклу сушіння необхідно регулювати як інтенсивність теплопідведення, так і ступінь осушування сушильного агента.

З метою створення керованого процесу сушіння, а також для підвищення ефективності сушарки при розробці схеми теплонасосної сушарки запропоновано ряд технічних рішень [65].

Слід зазначити, що в процесі теплонасосного сушіння в конденсаторі теплового насоса виділяється теплоти більше ніж необхідно для зневоднення матеріалу. Тому частину теплоти конденсації необхідно відводити за межі сушильної камери за допомогою зовнішнього конденсатора, який працює послідовно з внутрішнім конденсатором. Для підтримання заданої температури сушильного агента на сталому рівні на першій стадії процесу, коли з матеріалу видаляється велика кількість вологи, відведення теплоти зовнішнім конденсатором мінімальне, по мірі висушування продукту для запобігання перегріву поверхні матеріалу кількість теплоти, що відводиться, збільшується.

Регулювання вологості сушильного агента можливо здійснювати таким чином: повітря, що йде з сушарки, розділяється на два потоки, один з яких надходить до випарника теплового насоса, де охолоджується та осушується, після чого змішується з частиною вологого теплоносія та подається на нагрівання до конденсатора теплового насоса і далі – до сушильної камери. Під час сушіння пряно-ароматичної сировини до сушильної камери

повертаються і випарені леткі речовини, що дає можливість регулювати парціальний тиск летких речовин в сушильному агенті, і, як наслідок, зменшити їхнє випаровування. Сконденсована у випарнику і зібрана в конденсатозбірнику волога являє собою міжклітинну і внутрішньоклітинну рідину, що вилучена з рослин, і тому є біологічно активною рідиною.

Як показали дослідження, при роботі теплонасосного агрегату за схемою з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду можливо в 1,5-2 рази зменшити енерговитрати на процес сушіння. Для реалізації такої схеми необхідно встановити перед випарником теплового насоса рекуперативний теплообмінник «повітря-повітря».

На рис. 5.1 надана схема конвективної сушарки з тепловим насосом.

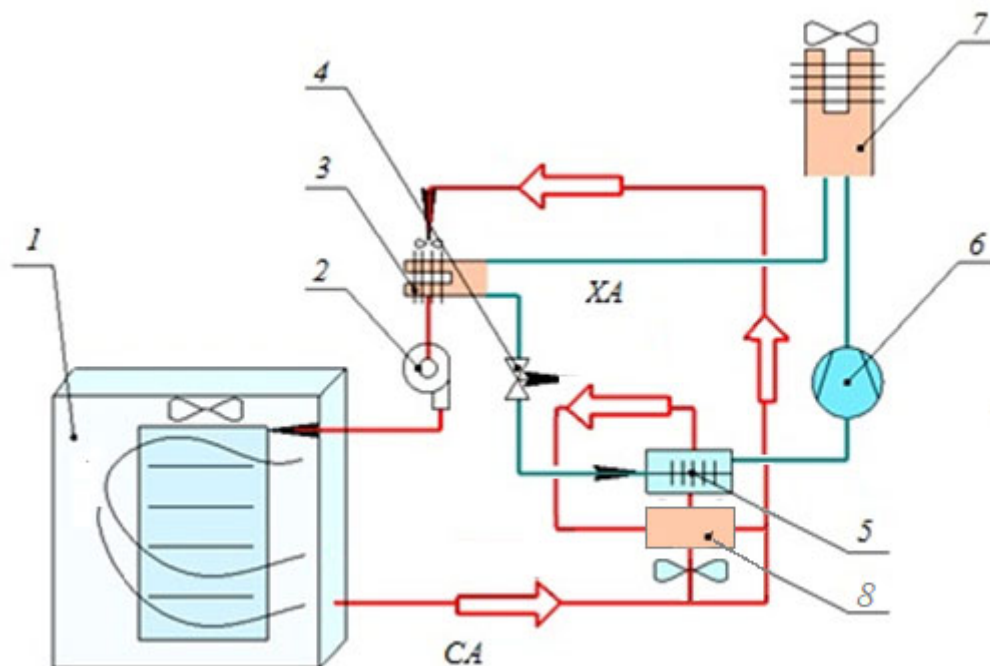


Рис. 5.1 – Удосконалена схема теплонасосної сушарки

- 1 – сушильна камера; 2 – вентилятор; 3 – внутрішній конденсатор;
 4 – дросель; 5 – випарник; 6 – компресор; 7 – зовнішній конденсатор;
 8 – рекуперативний теплообмінник;

СА – контур сушильного агента; ХА – контур холодоагента

Робота сушарки (рис. 5.1) здійснюється таким чином. Нагріте у конденсаторі 3 теплового насоса сухе повітря (точка *a* процесу зневоднення в *H-d* діаграмі, рис. 4.3 в) надходить до сушильної камери 1, де обдуває візок із продуктом і, відбираючи вологу від продукту, адіабатично зволожується (процес *a-b*). Після цього зволожене повітря розділяється на два потоки, один із яких повертається на рециркуляцію, а другий подається в тепловий насос на осушення. Осушуване повітря спочатку частково охолоджується в рекуперативному теплообміннику «повітря-повітря» 8 (процес *b-b'*), після чого доохолоджується у випарнику 5 теплового насоса (процес *b'-c-d*). При цьому частина вологи, що міститься в повітрі, конденсується, і вода виводиться з об'єму сушильної камери. Після проходження через випарник 5 охоложене й осушене повітря підігрівається в рекуператорі 8 (процес *d-d'*) і змішується з вологим рециркулюючим повітрям (процеси *d'-e* і *b-e*). Змішане повітря (точка *e*) підігрівається в конденсаторі 3 (процес *e-a*), і цикл повторюється. Для забезпечення постійної температури сушіння надлишок тепла за допомогою додаткового зовнішнього конденсатора 7 відводиться в оточуюче середовище.

Для виконання розрахунків апаратів теплонасосного агрегату рекомендується задаватися такими вихідними параметрами:

- номінальна продуктивність сушарки по вилученій волозі	2,5 кг/год;
- максимальна температура сушильного агента	55 °С
початковий вологовміст матеріалу	84-90 %
- кінцевий вологовміст	10-15 %
- завантаження	до 30 кг

5.2 Теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат

Основними елементами теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату є компресор, випарник, конденсатор, дросель та вентилятор, а також рекуперативний теплообмінник «повітря-повітря» (рис.5.2).

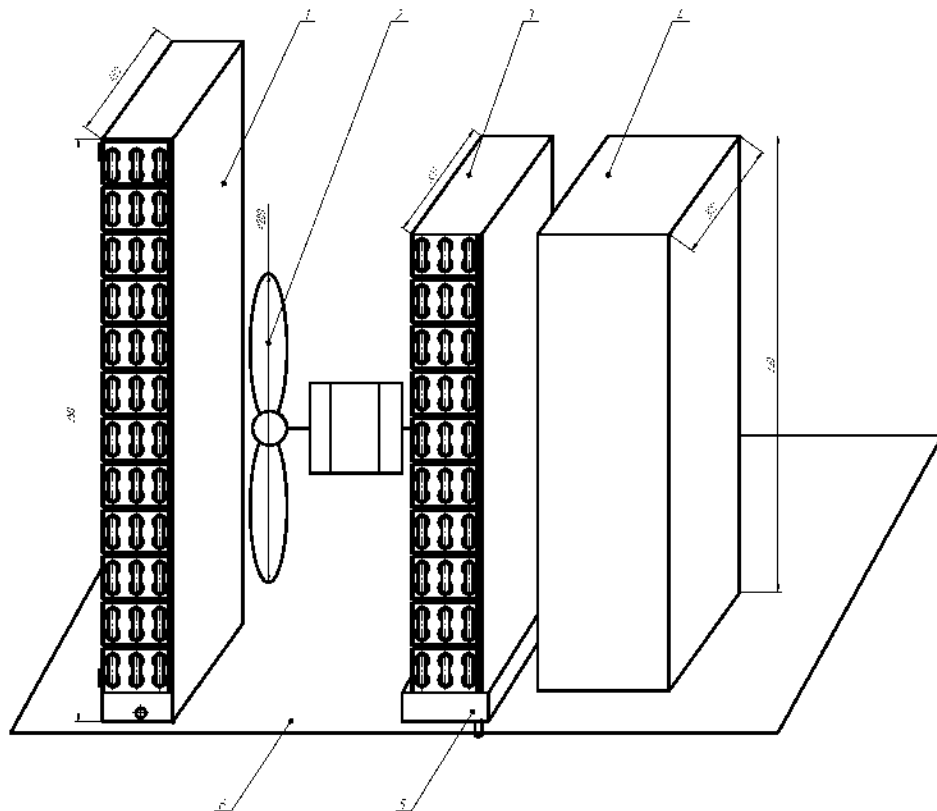


Рис. 5.2. Схеме теплонасосного агрегата

1 – конденсатор; 2 – вентилятор; 3 – випарник; 4 – рекуперативний теплообмінник «повітря-повітря»; 5 – конденсатозбірник.

Як основу теплонасосного агрегату приймаємо холодильний фреоновий компресор ZR49K3E-TFD. Згідно з паспортними даними холодопродуктивність компресора на фреоні R22 при температурі випаровування $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, температурі конденсації $t_k = 80^{\circ}\text{C}$ становитиме $Q_0 = 9080$ Вт. Споживана потужність електродвигуна компресора $N_k = 4020$ Вт.



Рис. 5.3. Компресор

Приймаємо до установки в теплонасосному агрегаті як випарник стандартний теплообмінний апарат.

Технічна характеристика випарнику:

- площа теплообмінної поверхні, m^2 , F_s 36;
- кількість рядів по глибині, шт, n 10;
- кількість труб в одному ряді, шт, n_p 7;
- кількість ребер, шт. 268;
- матеріал труб, мідь марка М1;
- габаритні розміри, м: висота x ширина x глибина 0,75 x 0,18 x 0,75.

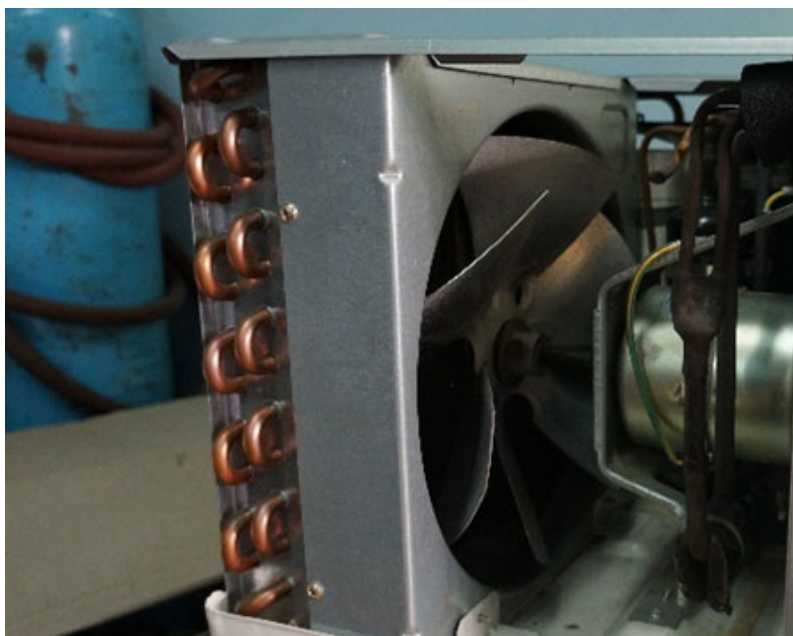


Рис. 5.4. Конденсатор і вентилятор

Приймаємо до установки в теплонасосному агрегаті як конденсатор стандартний теплообмінний апарат.

Технічна характеристика конденсатора:

- площа теплообмінної поверхні, м² 38;
- кількість рядів по глибині, шт. 10;
- кількість труб в ряді, шт. 7;
- кількість ребер, шт. 268;
- крок ребра, м 0,0028;
- матеріал труб, мідь марка М1;
- габаритні розміри, м: висота x ширина x глибина 0,75 x 0,18 x 0,75.



Рис. 5.5. Рекуперативний теплообмінник «повітря-повітря»

За результатами експериментальних досліджень спроектований та виготовлений теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат

Технічні характеристики:

- температура нагріву теплоносія	до 55 °С
- електрична потужність компресора	1 кВт
- електрична потужність вентилятора	0,2 кВт
- витрати повітря через випарник	350 м ³ /год
- номінальна продуктивність по вилученій волозі	до 2,5 кг/год
- питомі витрати енергії на випаровування вологи	0,5-0,7 кВтгод/л

З метою визначення експлуатаційних характеристик агрегат інтегрований в систему підготовки теплоносія конвективної сушарки камерного типу для проведення технологічних випробувань (Додаток 2, 3).

5.3 Конвективна теплонасосна сушильна установка

Теплонасосна сушарка призначена для сушіння термолабільних матеріалів із застосуванням теплонасосних циклів.

За допомогою теплонасосної сушарки можливо здійснювати зневоднення різноманітних матеріалів рослинного та тваринного походження, синтетичних матеріалів і виробів, лікарських трав та грибів, овочів, фруктів.

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

У теплонасосній сушарці зневоднювальний матеріал б розміщують на піддонах 5 (рис. 5.7) і завантажують до сушильної камери 3 (у технологічний відсік), де циркулює гарячий сушильний агент. При вмиканні циркуляційного вентилятора теплонасосного агрегату гарячий потік сухого сушильного агенту, температуру якого задають на пульті управління 2,

направляють до технологічного відсіку, де потік проходить над вологим матеріалом. Проходячи над матеріалом, сушильний агент нагріває його і зневоднює, змінюючи при цьому свій вологовміст. Сушильний агент охолоджується і зволожується. Відпрацьований вологий сушильний агент надходить на всмоктування до вентилятора 12. Далі розділяється на два потоки, перший із яких подається на змішування з осушеним повітрям, а другий подається до охолоджувального каналу рекуперативного теплообмінника 10, де охолоджується за рахунок теплообміну з осушеним та охолодженим в випарнику повітрям, яке проходить через нагріваючий канал рекуперативного теплообмінника 10. Охоложене в рекуперативному теплообміннику повітря надходить до випарника 9 і далі охолоджується до температури точки роси. З нього вилучають скраплену вологу, яку виводять із сушарки в накопичувач конденсату 11. Зневоднений охолоджений сушильний агент надходить в нагріваючий канал рекуперативного теплообмінника 10, де нагрівається за рахунок теплообміну з сушильним агентом, який надходить на охолодження. Після виходу з теплообмінника сушильний агент змішують з відпрацьованим сушильним агентом і далі вентилятором 8 подають на конденсатор 7 теплового насоса, де нагрівають до заданої температури. Після виходу з конденсатора гарячий зневоднений сушильний агент за допомогою циркуляційного вентилятора 1 направляється в напірний повітропровід 4 та знову надходить до сушильної камери.

Між конденсатором і випарником відбувається циркуляція фреону. З випарника фреон, який кипить при низькій температурі, у вигляді пари надходить до компресора, де пара стискується. При стисненні фреон нагрівається і надходить до конденсатора. У конденсаторі нагрітий фреон віддає тепло повітрю і нагріває його, а сам охолоджується і конденсується.

Далі сконденсований фреон повертається до випарника, де випаровується за рахунок передачі тепла від повітря до фреону та конденсації вологи теплоносія, і тим самим повітря охолоджується і з нього виводиться скраплена волога.

Тобто охолодження і зневоднення сушильного агенту у випарнику та його нагрівання у конденсаторі проходить за умов реалізації теплонасосного циклу в компресійному холодильному агрегаті, при якому утилізується теплота конденсації пари сушильного агенту, що дозволяє значно скоротити витрати енергії та скоротити процес сушіння із збереженням всіх корисних властивостей термолабільних матеріалів.

Переваги сушарки: простота, надійність конструкції, широка область застосування, рециркуляція сушильного агенту, що дозволяє проводити сушіння в контрольованій атмосфері, підвищення ККД використання теплової енергії та енергоефективності за рахунок збереження частини тепла, що відбирається від сушильного агенту під час його осушення.

Технічні характеристики:

- температура сушіння	40-55 °С
- електрична потужність	1,2 кВт
- номінальна продуктивність по вилученій волозі	до 2,5 кг/год
- питомі витрати енергії на випаровування вологи	0,5-0,7 кВтгод/л
- завантаження сушарки	до 30 кг
- початковий вологовміст матеріалу	80-90 %
- кінцевий вологовміст матеріалу	10-15 %

За технічним рівнем технологія і зразок сушарки відповідають 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.

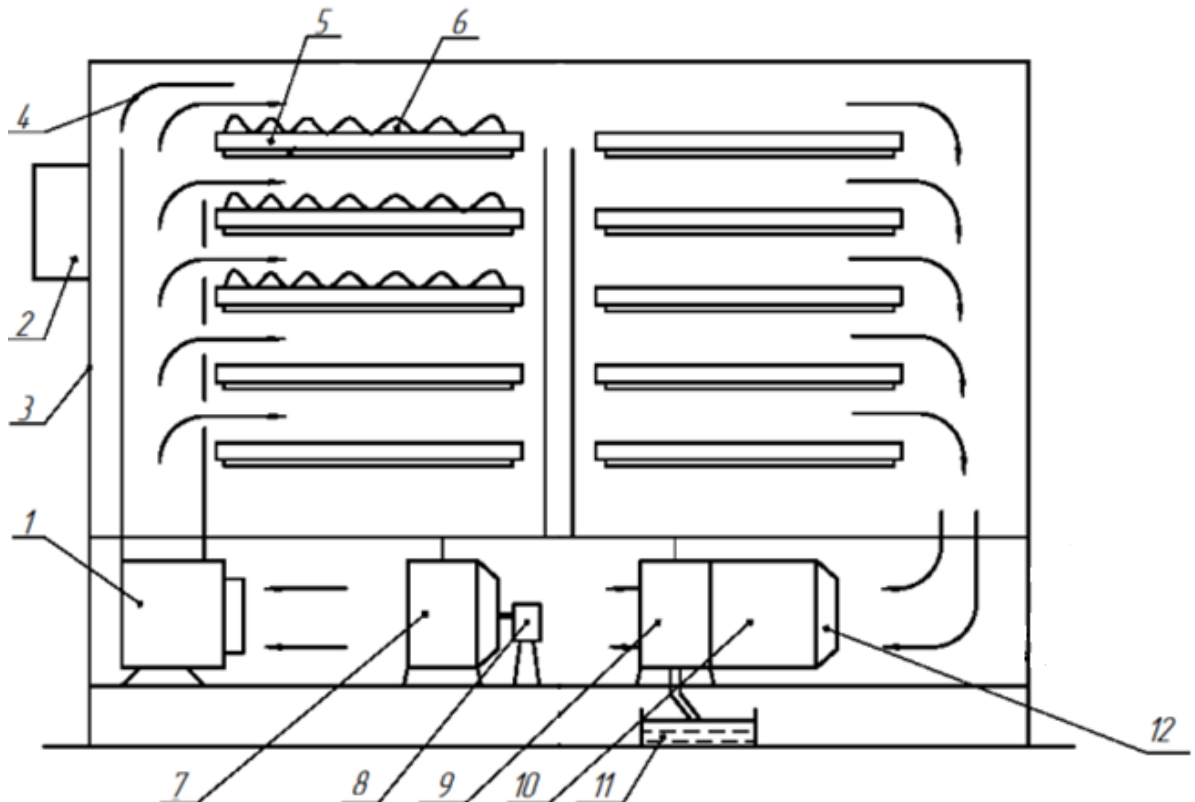


Рис. 5.7 Схема теплонасосної сушарки:

1 – циркуляційний вентилятор нагрітого повітря; 2 – пульт управління; 3 – сушильна камера; 4 – напірний повітропровід; 5 – піддон; 6 – матеріал; 7 – конденсатор ТН; 8 – вентилятор; 9 – випарник ТН; 10 – рекуператор; 11 – накопичувач конденсату; 12 – вентилятор; 13 – шибер; 14 – повітропровід.

За результатами проведеної роботи буа введена в експлуатацію конвективна сушильна теплонасосна установка (Додаток 4).

5.4 Енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія

В Інституті Технічної Теплофізики були розроблені багатозонні тунельні сушильні установки, що використовуються при завантаженні від 200 кг за годину до 1000 кг. в яких використовувались парові теплогенератори або на газу, які призначені підігрівати повітря, що подається в сушарку [66]. За

допомогою згоряння природного газу відбувається нагрівання повітря. Прямий контакт між продуктами згоряння та підігрівом повітря відсутні. Парові сушарки працюють на парових калориферах. Недоліком цих сушарок є використання газу і пари, які мають високу вартість. Для використання в малих фермерських господарствах з різноманітною сировиною та об'ємом виробництва до 200 кг на добу їх використовувати недоцільно. Тому була розроблена енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія з використанням товстоплівкових нагрівальних елементів та ламп інфрачервоного випромінювання.

Камерна сушарка (рис. 5.8.) складається із сушильної камери (1), в яку заїжджають два візки (5,7). Корпус, в свою чергу, поділяється на внутрішній та зовнішній. Сушильна камера (1) ізолювана базальтовою ватою, товщина шару якої коливається від 0,2 до 0,35 м. Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) (продуктивність 4000 м. куб/год., робочий тиск 360 Па) на вході в сушильну камеру. Для нагрівання теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4,6) загальною потужністю 42 кВт. Кабелі, котрі живлять нагрівальні елементи всередині камери, використали негорючого типу НГ із температурним допуском + 110 °С. Для роботи камерної сушарки передбачені автоматичні пристрої для регулювання [66]:

- температури теплоносія (реле температури ТК - 6);
- час роботи (реле часу Т - 2);
- швидкість руху теплоносія (частотний регулятор) .

В середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологи та температури РКВТ – 2/16. Вони розміщені на вході в сушарку теплового агента, між візками та на виході із сушарки теплоносія. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагенту в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря.

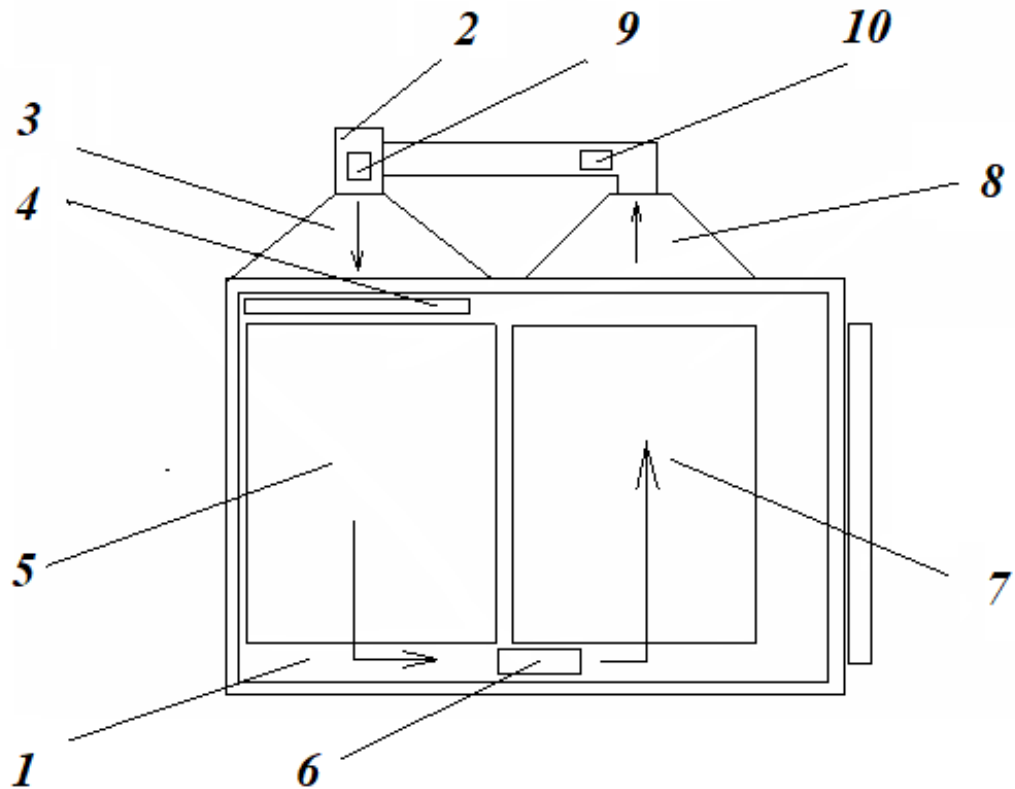


Рис. 5.8. Схема камерної сушарки

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.

Розроблена сушарка являє собою камеру (1), в яку заїжджають два візки загальною площею сушіння 20 м^2 (рис. 5.8). Для збільшення ефективності всередині камери змонтовані нагрівальні елементи, відповідно до руху теплового агента, нагрівальні елементи встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. 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 конфузор (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 [66].

Нагрівальний елемент рис. 5.9, який використаний в тунельній сушарці в кількості 42 шт.



Рис. 5.9. Товстоплівковий нагрівальний елемент тип якого використаний в тунельній сушарці
НЕ 385x75x3мм; U-220 В; P-1000 Вт.

Нагрівальні елементи розміщені на протилежних стінках тунельної сушарки по 21 шт. рис. 5.10.

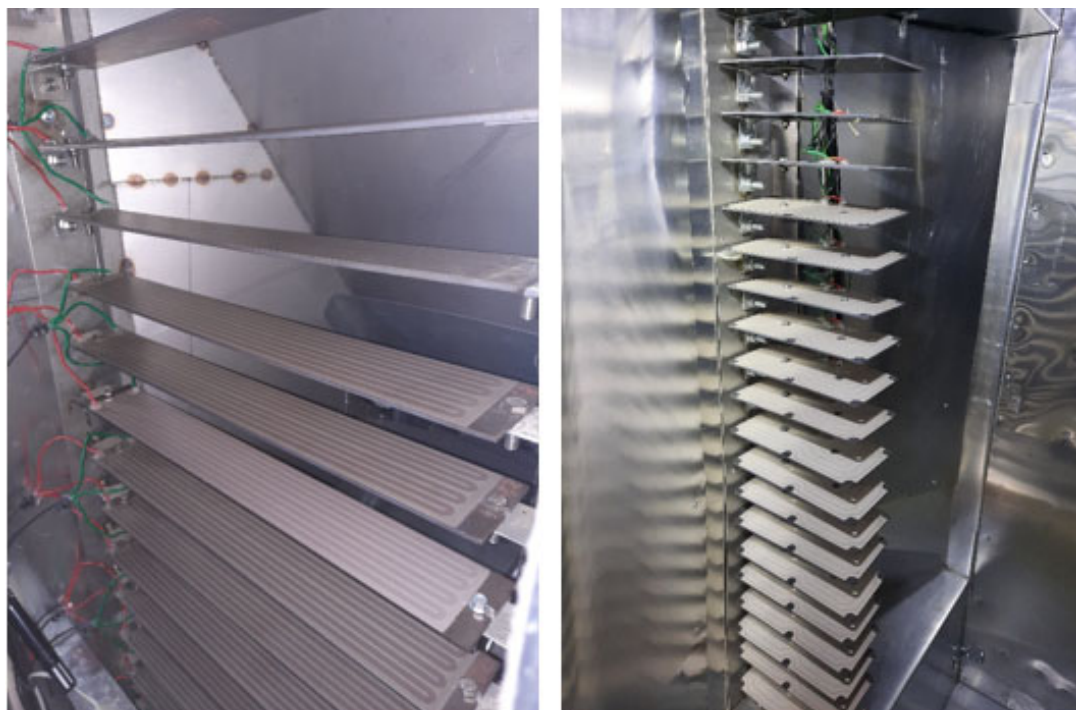


Рис. 5.10. Товстоплівкові нагрівальні елементи встановлені в тунельній сушарці

Кількість нагрівальних елементів 21 + 21 шт., потужність кожного елемента 1 кВт, відстань між елементами 60 мм.



а)

б)

в)

Рис. 5.11. Енергоефективна камерна сушарка для сушіння рослинної сировини.

а – вигляд зпереду, б – шафа керування, в – вигляд з візками.

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА КАМЕРНОЇ СУШАРКИ

Продуктивність по вологій сировині, кг	100
Температура сушіння матеріалу, °С	50 – 100
Швидкість руху теплоносія, м/с	1 - 5
Загальна потужність установки, кВт	43,5
Продуктивність вентилятора, м ³ /год.	3000
Тиск вентилятора, Па	380
Кількість візків в установці, шт.	2
Кількість піддонів на візку, шт.	20
Загальна площа сушіння, м ²	20
Габаритні розміри сушарки, м	1,43x1,87x1,79

Процес сушіння матеріалу здійснюється наступним чином: сировина проходить стадію очистки та миття, нарізається пластинками на овоченарізній машині та укладається моношаром на візки (рис. 5.12).



Рис. 5.12. Візки із матеріалом перед роботою.

Завантажені візки заковчуються в камеру, та сушарка зачиняється ролетою (рис. 5.11, а). Шибери переводимо в положення «закрито». Виставляємо на реле часу та температури необхідні режими сушіння і запускаємо сушарку. Температура в камері при повній рециркуляції теплоносія швидко зростає та досягає потрібного значення, і сушарка

виходить на режим, після чого шибери переводять в робоче положення «відкрито».

5.5 Розроблення та дослідження рекуператоративного полімерного теплообмінника типу «повітря-повітря»

В Інституті технічної теплофізики був сконструйований полімерний перехресно-проточний рекуперативний теплообмінник типу “повітря-повітря” для забезпечення утилізації теплоти відпрацьованих в технологічних процесах сушіння повітряних теплоносіїв. Основною метою було створити ефективний теплообмінний апарат з точки зору теплопередаючих властивостей, енергетичних витрат на його роботу та вартісних показників, а також провести дослідження теплообміну і гідродинаміки в створеному апараті для визначення його енергетичних характеристик.

Для виготовлення теплообмінних поверхонь о використовували широко розповсюджений сьогодні полімер – сотовий полікарбонат. Було обрано листи сотового полікарбонату розміром 250x250 мм з висотою сот 4 мм і товщиною стінки 0,15 мм. Лист полікарбонату розпускався навпіл таким чином, що утворювались дві ребрені стінки з висотою ребра 2 мм [67]. Їх складали під кутом 90° відносно повздовжніх осей сот в пакет висотою 150 мм з перехресними каналами перетином 4x2 мм.

Полікарбонати використовуються у випадках, коли для матеріалу висуваються умови високої міцності, теплопровідності, термостійкості (при використанні сотового полікарбонату), мала текучість, стабільність розмірів виробів, негорючість, діелектричні властивості, незначне водопоглинання, фізіологічна інертність і стійкість до дії різних хімічних реагентів.

Густина монолітного полікарбонату вдвічі менша ніж звичайного скла, на 15 % менша за полівінілхлорид та на 6 % менша за поліестер. Густина сотового полікарбонату (рис.2.4) менша від монолітного в кілька разів [68] .

Теплоізоляційні властивості полікарбонату на 25 % більші ніж у скла та поліетилену. Використання сотового полікарбонату підвищує ці властивості у рази.

Прозорість полікарбонату така ж як і у скла – показник заломлення дорівнює 1,59. Ударостійкість полікарбонату оцінюється величиною 900 – 1100 кДж/м² (без надрізу) [67–69] .

В зазначено, що термічний аналіз показав можливість застосування сотового полікарбонату до температури 130 °С. Цей матеріал при температурах 250 – 290 °С переходить у рідку фазу.

На лабораторній установці, що описана в підрозділі 2.4, проведені дослідження процесів теплообміну і гідродинаміки в сконструйованому рекуперативному полімерному теплообміннику.

В ході виконання досліджень було проведено серію експериментів в діапазоні швидкостей теплоносіїв від 2,2 до 9 м/с, та початкових температур від 10 до 16 °С і 30 до 70 °С.

Після першого етапу досліду при потужності електронагрівача 300 Вт, в результаті виконання якого визначаються температури гарячого і холодного теплоносіїв на вході і на виході з каналів теплообмінника. Для отримання масиву даних змінюється потужність вентилятора, змінюється швидкість руху теплоносіїв і фіксуються нові значення температур. Результати записуються в таблицю, що представлена нижче (Таблиця 2.2).

Як можна помітити, зі збільшенням швидкості руху теплоносіїв майже в чотири рази, значення температури $T_{\text{вих}}^x$ холодного теплоносія на виході з теплообмінника зменшується майже вдвічі, тоді як для гарячого теплоносія температури $T_{\text{вих}}^g$ на виході змінюються неістотно.

Таблиця 2.2

Результати експерименту при потужності 300 Вт

V	$T_{ВХ}^X$	$T_{ВИХ}^X$	$T_{ВХ}^Г$	$T_{ВИХ}^Г$
м/с	°C	°C	°C	°C
2,2	11,57	55,55	58,27	20,78
2,7	11,07	49,32	49,94	17,20
3,1	11,26	34,03	37,50	17,61
3,5	9,33	27,65	29,98	14,06
4,1	14,97	55,26	60,48	25,94
4,5	15,34	40,92	49,58	28,03
4,8	14,31	35,12	39,14	21,08
5,4	14,60	42,57	50,37	26,55
5,7	15,45	49,54	58,91	29,60
6	15,33	31,36	38,03	25,24
6,5	15,52	31,22	37,83	25,42
7	14,44	43,57	55,81	31,54
7,6	14,09	45,27	59,11	33,12
8	15,70	31,01	37,45	25,48
8,3	14,02	21,18	24,13	18,60
9	14,85	25,93	30,48	21,34

За наданою у розділі 2.4 методикою за виразами (2.8) – (2.15) опрацьовані виміряні дані, розраховані теплові потоки, коефіцієнти теплопередачі, на основі яких визначалась величина NTU, ефективність теплообмінника η в залежності від швидкості руху теплоносіїв. Результати опрацювання дослідних даних надані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2.

Результати обрахунків на базі експериментальних досліджень

W	NTU	β_1	β_2	T(x)1	T(x)2	η	G
Вт/с				С	С		Кг/с
0,021	0,00057	0,21831	0,21831	23,3122	48,264	0,00057	0,021
0,025	0,00047	0,26792	0,26792	20,2982	42,0362	0,00047	0,025
0,029	0,00041	0,30762	0,30762	16,3638	33,0387	0,00041	0,029
0,033	0,00036	0,34731	0,34731	13,1636	26,6486	0,00036	0,033
0,039	0,00031	0,40685	0,40685	22,6371	53,9048	0,00031	0,039
0,042	0,00028	0,44654	0,44654	19,9336	45,7095	0,00028	0,042
0,045	0,00026	0,47631	0,47631	17,8943	36,033	0,00026	0,045
0,051	0,00023	0,53585	0,53585	19,0476	46,5802	0,00023	0,051
0,054	0,00022	0,56562	0,56562	20,6774	54,4167	0,00022	0,054
0,057	0,00021	0,59538	0,59538	17,6996	36,1358	0,00021	0,057
0,061	0,00019	0,645	0,645	17,7144	36,0989	0,00019	0,061
0,066	0,00018	0,69462	0,69462	18,2967	52,5986	0,00018	0,066
0,072	0,00017	0,75415	0,75415	17,967	55,8713	0,00017	0,072
0,075	0,00016	0,79385	0,79385	17,5322	36,0165	0,00016	0,075
0,077	0,00015	0,82362	0,82362	14,8537	23,4854	0,00015	0,077
0,085	0,00014	0,89308	0,89308	16,0603	29,4812	0,00014	0,085

Графічна інтерпретація залежності ефективності сконструйованого перехресно-проточного полімерного теплообмінника типу “повітря-повітря” в залежності від швидкості руху теплоносіїв наведена на рис. 5.13.

Вимірювання проводилися в діапазоні швидкостей повітря від 2 до 9 м/с. При близьких значеннях швидкості руху повітря було проведено декілька дослідів, які показали малий розкид значень експериментальних точок, що показує високу точність вимірювань. Графічна залежність коефіцієнта тепловіддачі в каналах рекуперативного теплообмінника показана на рис. 5.14. Залежність коефіцієнта теплопередачі між каналами рекуперативного теплообмінника наведена на рис. 5.15 [70, 71].

Для зручності використання отриманих кривих для виконання теплотехнічного розрахунку апаратів теплового насосу дані апроксимували та представили в вигляді аналітичних залежностей:

- аналітична залежність ефективності від швидкості руху теплоносія

$$E = 80,208V_k^{-0,264} \quad (5.1)$$

- аналітична залежність коефіцієнта тепловіддачі в каналах рекуперативного теплообмінника від швидкості руху теплоносія

$$\alpha = 12,601V^{0,5687} \quad (5.2)$$

- аналітична залежність коефіцієнта теплопередачі в каналах рекуперативного теплообмінника від швидкості руху теплоносія

$$k = 6,2956V^{0,5654} \quad (5.3)$$

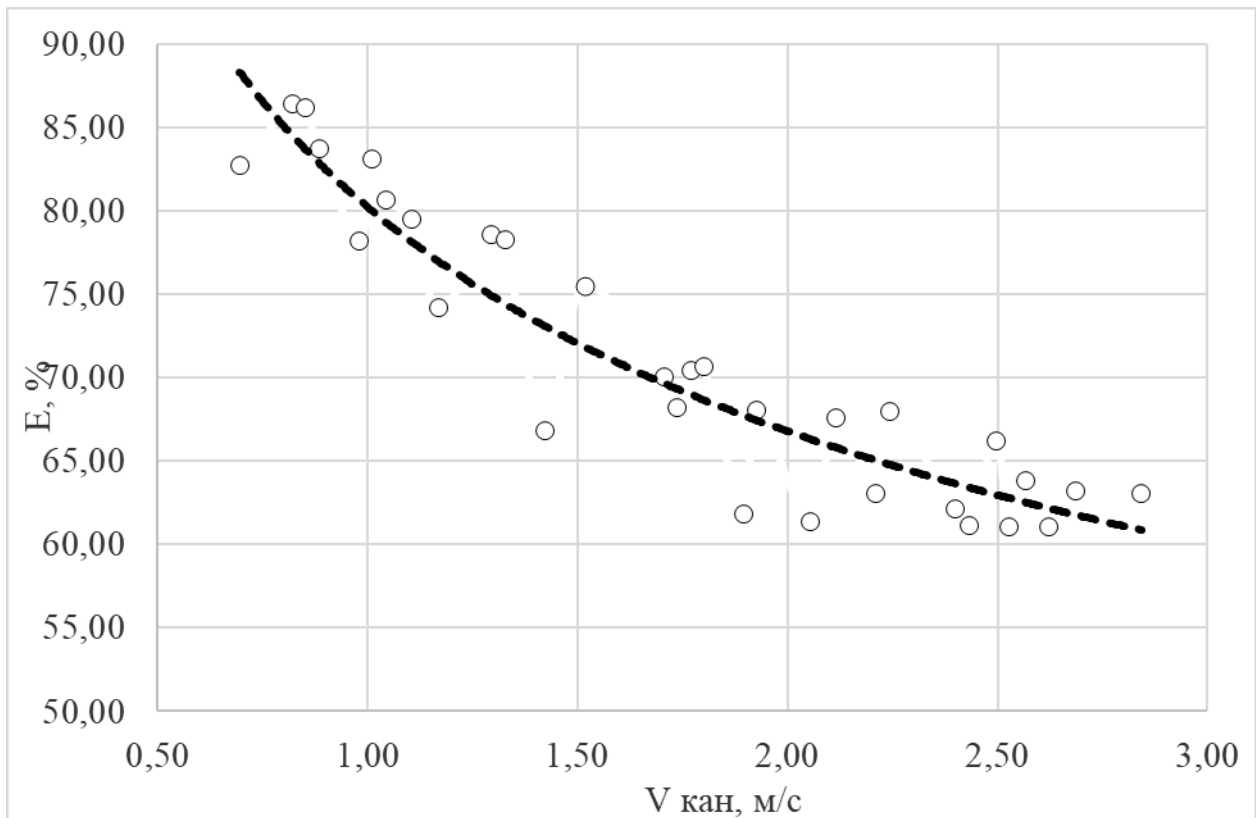


Рис. 5.13. Залежність ефективності рекуператора від каналісної швидкості теплоносія

Ефективність теплообмінника запропонованої конструкції досягає 90% при швидкості теплоносія 2 м/с та знижується до 82 % при зростанні швидкості до 3 м/с. Подальше підвищення швидкості призводить до зниження ефективності роботи теплообмінника по експонентній залежності.

Слід зазначити, що швидкості в діапазоні 1,5 3 м/с є застосовуваними в сушильних установках, де пропонується підігрівання свіжого повітря з низькою відносною вологістю, що частково замінює відпрацьований сушильний агент. Також зазначений діапазон швидкостей має місце в системах вентиляції виробничих і житлових приміщень, теплиць та тваринницьких ферм.

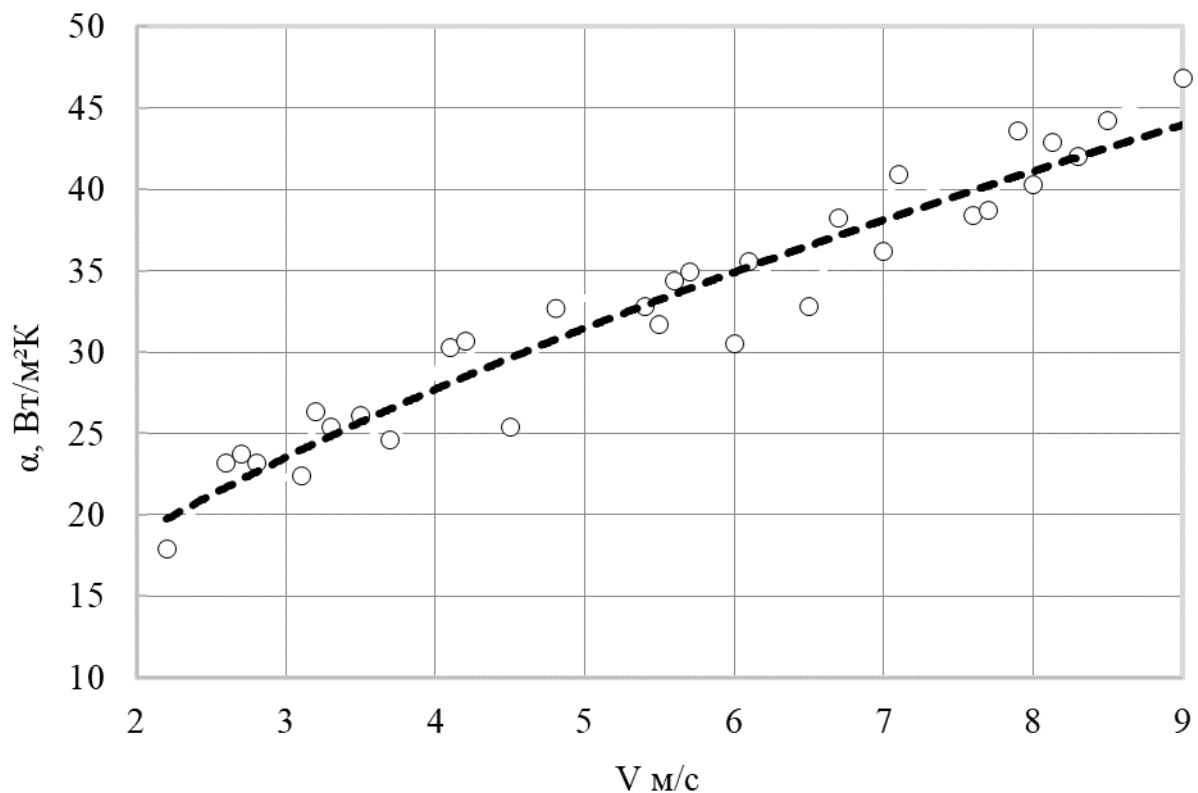


Рис. 5.14 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі в каналах рекуперативного теплообмінника

Як видно з графіка залежності коефіцієнта тепловіддачі в каналах рекуперативного теплообмінника зі збільшенням швидкості коефіцієнт тепловіддачі зростає. При збільшенні швидкості з 4 до 8 м/с коефіцієнт тепловіддачі зростає в 1,55 рази.

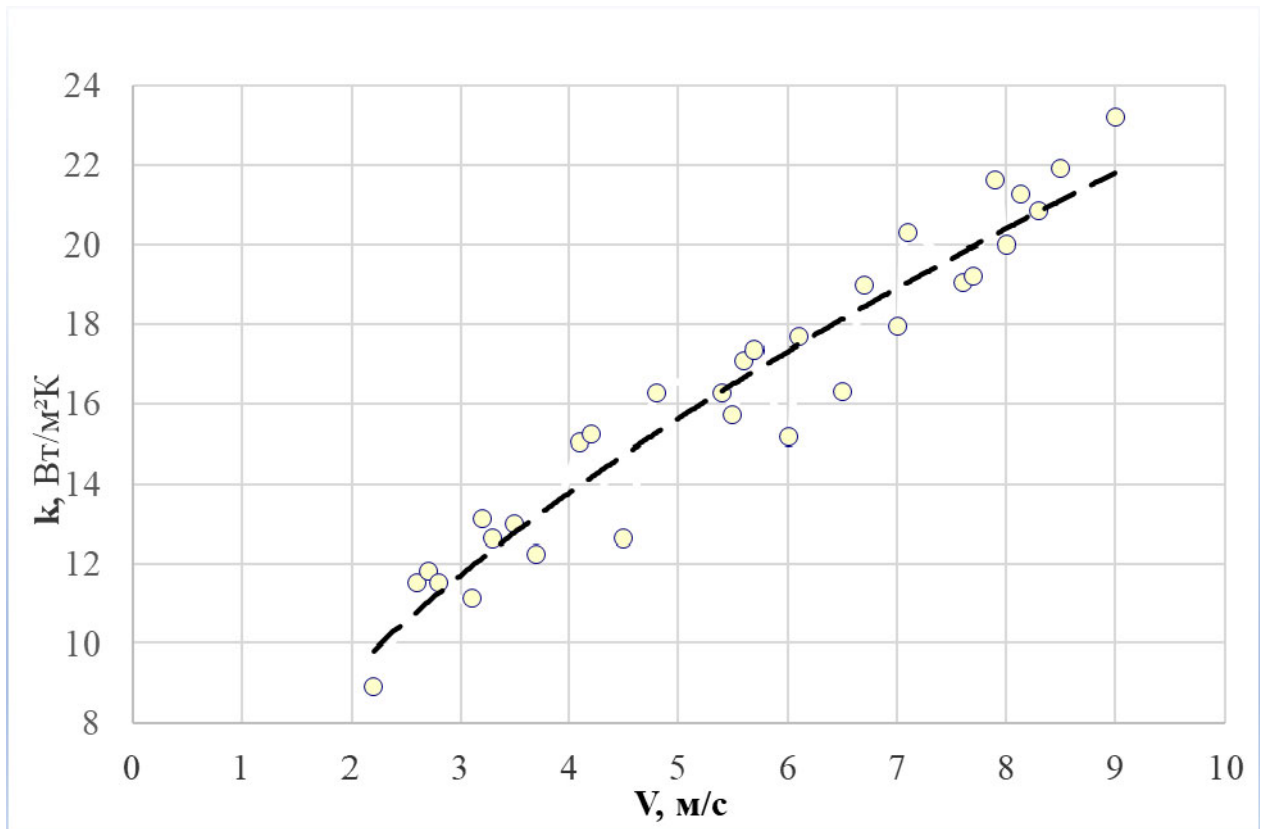


Рис. 5.15 – Залежність коефіцієнта теплопередачі між каналами рекуперативного теплообмінника

Як видно з графіка залежності коефіцієнта теплопередачі між каналами рекуперативного теплообмінника зі збільшенням швидкості коефіцієнт теплопередачі також зростає. При збільшенні швидкості з 4 до 8 м/с коефіцієнт теплопередачі зростає в 1,45 рази.

Важливим питанням для вибору потужності вентилятора, що забезпечує надійну роботу теплообмінника є визначення величини гідравлічних втрат.

Гідравлічні втрати визначаються різницею тисків теплоносія на вході в канали теплообмінника і виходу з них.

Для вимірювання тиску теплоносіїв на вході і виході з каналів лабораторної установки залучався диференційний манометр Testo 521-2 німецького виробництва в комплекті з трубкою Піто.

Фактичний діапазон роботи диференційного манометра Testo 521-2 є:

- По температурі: від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ з похибкою в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- По тиску: від 0 до 100 гПа з роздільною здатністю в 0,01 гПа [30];
- Для діапазону швидкостей 1...12 м/с залучається зонд тиску 100 гПа.

Оновлення дисплею здійснюється раз в дві секунди.

Трубка Піто цього пристрою поміщалась спочатку в потік холодного теплоносія перед каналами подачі холодного теплоносія в теплообмінник, а потім на виході з каналів гарячого теплоносія. Для цього в поверхнях стінки, що обмежує потік холодного теплоносія, за вентилятором перед каналами теплообмінника, і за каналами гарячого теплоносія теплообмінника, було зроблено технологічні отвори. Швидкість руху теплоносіїв на початку проведення дослідів встановлювалась максимальною – 12,2 м/с, а потім поступово зменшувалась до 1,5 м/с. Показники фіксувались на екрані манометра, після чого заносились до відповідної таблиці (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 Результати досліджень гідравлічних втрат

1	12,2	18,6	182,5319	7	68,6948	113,8371
2	12	18,5	181,5505	6,8	66,73209	114,8184
3	11,8	18,3	179,5878	6,7	68,75074	113,8371
4	11,5	17,8	174,6811	6,5	63,78803	110,893
5	11	16,7	163,8862	5,7	55,93719	107,949
6	7,8	11,3	110,893	3,7	36,31011	74,58292
7	7	6,3	61,82532	1,9	18,64573	43,17959
8	5	5,5	53,97448	1,2	11,77625	42,19823
9	4,2	3,7	36,31011	0,9	8,832188	27,47792
10	2,9	2,4	23,5525	0,4	3,925417	19,62709
11	2,4	1,9	18,64573	0,3	2,944063	15,70167
12	1,5	1,2	11,77625	0,2	1,962709	9,813543

Графічна інтерпретація результатів вимірювання представлена на рис. 3.16, а результати падіння тиску при проходженні теплоносія крізь канали теплообміннику на рис. 3.17 [65].

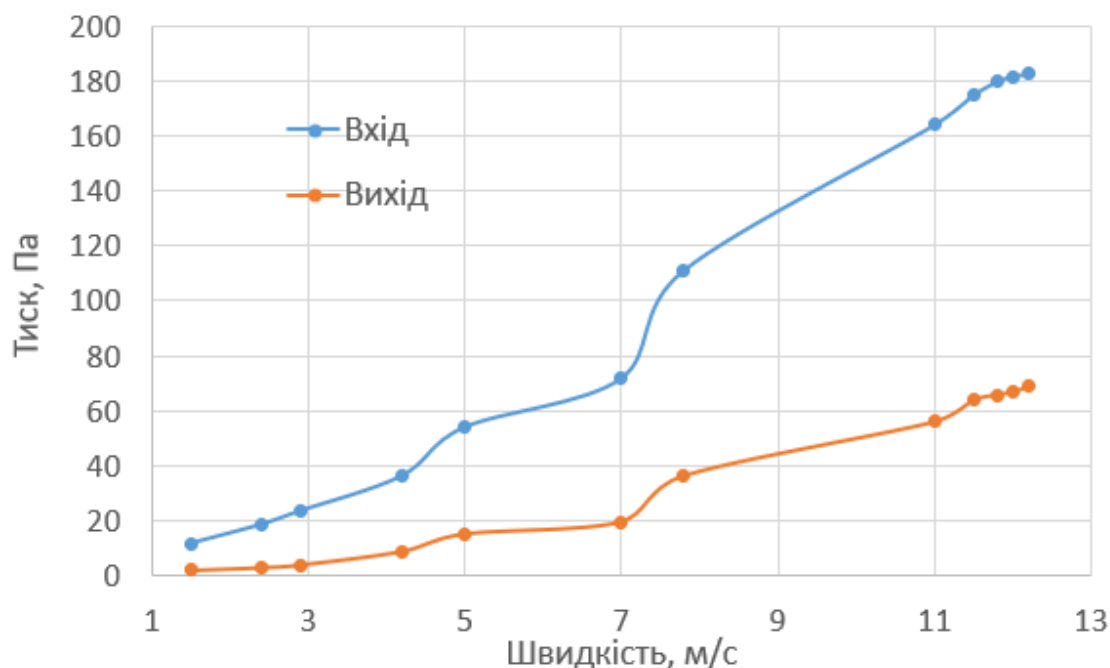


Рис. 3.16 – Залежності тисків холодного теплоносія на вході в теплообмінник і гарячого теплоносія на виході з теплообмінника від швидкості руху

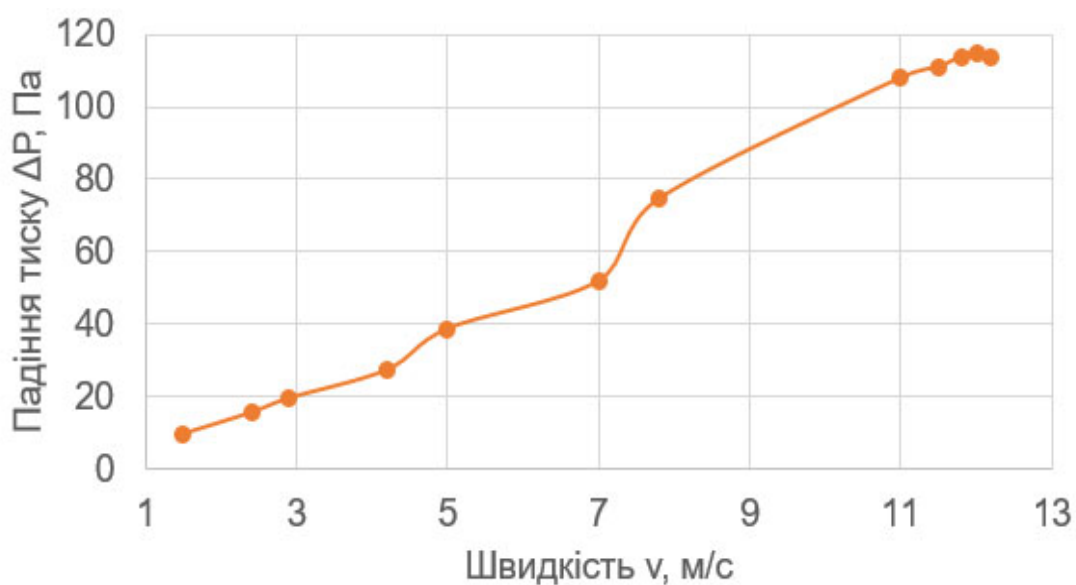


Рис. 3.17 – Залежність гідравлічних втрат в лабораторному теплообміннику від швидкості руху теплоносіїв

При збільшення швидкості теплоносіїв у 8 разів, гідравлічні втрати зростають більше, ніж у 11,5 разів.

Висновки до розділу 5

1. Проведено експериментальні дослідження теплопередачі і гідродинаміки в широкому діапазоні швидкостей теплоносіїв і початкових температур гарячого теплоносія.
2. Обрано методику обробки результатів вимірювання, що базується на методі чисел одиниць переносу теплоти, який на відміну від традиційного методу визначення коефіцієнту теплопередачі дозволяє відразу оцінити ефективність роботи теплообмінника.
3. Результати досліджень дозволяють обрати оптимальні режими роботи теплообмінника (в діапазоні швидкості теплоносіїв від 1,5 до 3 м/с), що забезпечать середню ефективність 90 %.
4. Спроектований, виготовлений та випробуваний теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат для конвективної теплонасосної сушарки. Питомі витрати енергії на випаровування вологи 0,5-0,7 кВтгод/л.
5. Створена та введена в експлуатацію конвективна теплонасосна сушарка з продуктивністю по вилученій волозі до 2,5 кг/год.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За ізотермами сорбції пари води м'ятою перцевою визначено, що для зменшення втрат ефірної олії, м'яту перцеву необхідно сушити до залишкового вологовмісту менше ніж 10 %.
2. За ізотерми адсорбції для м'яти перцевої в області гігроскопічного стану визначені залежності парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту в діапазоні температур 30...50 °С.
3. Визначена величина чистої ізостеричної теплоти адсорбції, за якою оцінюються мінімальні витрати енергії необхідні для процесу сушіння. Показано, що при видаленні адсорбційно-зв'язаної вологи питома теплота випаровування води з м'яти перцевої збільшується на 29 % в порівнянні з теплою паротворення.
4. Експериментально калориметричним методом одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурах 40 і 50 °С. Виявлено вплив летких речовин ефірної олії м'яти перцевої на теплоту випаровування.
5. Встановлено, що вибір температури сушіння пряно-ароматичних рослин в першу чергу визначається термочутливістю ефірних олій. Показало, що для запобігання значних втрат якості гранично допустима температура м'яти перцевої під час зневоднення не повинна перевищувати температуру плавлення ментолу 42,5 °С.
6. З аналізу кінетики сушіння м'яти перцевої з урахуванням гранично допустимої температури нагріву матеріалу визначені оптимальні режимні параметри сушіння: $t = 40$ °С, $v = 1$ м/с, $d = 8$ г/кг с.п. та $\delta = 1$ см.
7. Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння м'яти перцевої показали, що під час низькотемпературного зневоднення вологовміст сушильного агента суттєво впливає на швидкість процесу.

Зниження вологовмісту сушильного агента дозволяє на 25 % скоротити тривалість сушіння.

8. Розроблено ефективний метод інтенсифікації процесу сушіння пряно-ароматичної сировини шляхом зниження вологовмісту сушильного агента.
9. Для підвищення енергоефективності процесу зневоднення пряно-ароматичної сировини запропоновано використовувати конденсаційний метод сушіння з застосуванням теплового насоса. Показано, що питомі енерговитрати при теплонасосному сушінні в 2,7 рази менші ніж при конвективному.
10. Для оптимізації енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння пряно-ароматичної сировини розроблений алгоритм розрахунку осушення теплоносія та розраховані енерговитрати в теплонасосному циклі при різних температурах сушіння, ступенях осушення теплоносія, а також енергоефективностях рекуперативного теплообмінника.
11. Встановлено, що на зменшення поточних енерговитрат впливає зниження температури теплоносія та збільшення його вологовмісту: зниження температури з 55 до 40 °С дозволяє зменшити енерговитрати практично в 2 рази; збільшення вологовмісту з 6 до 20 г/кг с.п. знижує енерговитрати в 1,7 рази.
12. За даними з гіротермічної рівноваги та кінетики сушіння м'яти перцевої та енерговитрат теплового насоса на процес зневоднення розроблені енергозберігаючі режими сушіння м'яти перцевої зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента.
13. Встановлено, що застосування рекуперативного теплообмінника для рекуперації холоду дозволяє в залежності від його ефективності в 1,5...2 рази знизити витрати енергії на процес зневоднення.

14. Розроблений та створений рекуперативний перехресно-проточний полімерний теплообмінник типу «повітря-повітря» та досліджені його теплові характеристики.
15. Спроектований, виготовлений та випробуваний теплогенеруючий осушуючий теплонасосний агрегат для конвективної теплонасосної сушарки. Питомі витрати енергії на випаровування вологи становлять 0,5-0,7 кВтгод/л.
16. Створена та введена в експлуатацію конвективна теплонасосна сушарка з продуктивністю по вилученій волозі до 2,5 кг/год.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Дмитренко Н.В. & Малащук Н.С. (2023). Сорбційні та термодинамічні властивості пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 45, № 2, с. 5 – 14. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
2. *FAO. Trade in Medicinal Plants* [Electronic resource]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. – Available at: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/af285e/af285e00.pdf>. – Last access – 2014.
3. Павлюк Р.Ю., Погарская В.В., Яницкий В.В. и др. Товароведение и инновационные технологии переработки лекарственно-технического растительного сырья: уч. пособие. – Харьков: ХГУПТ, 2013. – 429 с.
4. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Енергоресурсозберігаючі технології зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 43, № 4, с. 7 – 16. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних*).
5. Nayak P., Kumar T., Gupta A.K. and Joshi N.U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. – 2020. – P.1519-1528.
6. Ковальов В.М., Павлій О.І., Ісакова Т.І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. – Харків: «Прапор» НФАУ, 2000. – 704 с.
7. Мінарченко В. М., Бутко А. Ю. Дослідження вітчизняного ринку лікарських засобів рослинного походження // *Фармацевтичний журнал*. – 2017. – № 1 – С. 30-36.
8. *Chakraborty R., Tilottama D. Drying Protocols for Traditional Medicinal Herbs: A Critical Review* // *International Journal of Engineering*

- Technology, Management and Applied Sciences. – 2016. – V. 4, I. 4 – P. 312-319.
9. *Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G.* A review of drying methods for improving the quality of dried herbs // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* – 2021. – V. 61, I.11 –P. 1763-1786.
 10. *Rajat Chakraborty & Tilottama Dey (2016).* Drying Protocols for Traditional Medicinal Herbs: A Critical Review. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Scie.* April 2016, Volume 4, Issue 4, ISSN 2349-4476
 11. *European Pharmacopoeia 8th Edition (Ph. Eur. 8), Council of Europe.* Strasbourg, 2014: 275-6, 1232-4, 1350-2, 1369-70.
 12. *Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G.* A review of drying methods for improving the quality of dried herbs // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* – 2021. – V. 61, I.11 –P. 1763-1786.
 13. *Blanco M.C.S.G., Ming L.C., Marques M.O.M., Bovi O.A.* Drying temperature effects in peppermint essential oil content and composition // *Acta Horticulturae.* – 2000. – V. 569. – P. 95-98.
 14. *Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Ільєнко О.О., Ловейко В.О.* Сушіння м'яти на конвективних сушильних установках // *Харчова промисловість.* – 2010. – Вип. 9 – С. 168-170.
 15. *Karami H., Rasekh M., Darvishi Y., Khaledi R.* Effect of Drying Temperature and Air Velocity on the Essential Oil Content of *Mentha aquatica* L. // *Journal of Essential Oil Bearing Plants.* – 2017. – V. 20, I. 4 – P. 1131-1136.
 16. *Дабіжа Н.О.* Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту: дис. канд. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2013. с. 98-99.
 17. *Mujumdar A. S.* Classification and Selection of Industrial Dryers / *Mujumdar A. S.* // *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying* / Ed. S.

- Devahastin – Montreal: Exergex Corp., 2000. – P. 23-36. ISBN 974-85913-9-5.
18. Grant Thamkaew, Ingegerd Sjöholm & Federico Gómez Galindo (2020). A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. Article in *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. May. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.
 19. Mohammad B. Hossain, Nigel P. Brunton & Dilip K. Rai (2020). Recent developments in high-quality drying of herbs and spices. *Herbs, Spices and Medicinal Plants: Processing, Health Benefits and Safety*, First Edition. Published 2020 by John Wiley & Sons Ltd.
 20. Mustafa Aktaş, Ataollah Khanlari, Burak Aktekeli & Ali Amini (2016). Development of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. ECRES – 4th European Conference on Renewable Energy Systems, Istanbul, TURKEY, 28-31 August 2016. 805-816.
 21. Joachim Müller (2007) Convective drying of medicinal, aromatic and spice plants: A review. *Stewart Postharvest Review*. An international journal for reviews in postharvest biology and technology. Published online 01 August 2007. doi: 10.2212/spr.2007.4.2
 22. Parv Nayak, Tankesh Kumar, AK Gupta & NU Joshi (2020). Peppermint a medicinal herb and treasure of health: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020; 9(3): 1519-1528. DOI: <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525>
 23. Mustafa Aktaş, İlhan Ceylan & Ali Etem Gürel (2014). Testing of a Condensation-type Heat Pump System for Low-temperature Drying Applications, *International Journal of Food Engineering* 2014; 10(3): 521–531. doi 10.1515/ijfe-2014-0124.
 24. Lihua Ye, Hany S. EL-Mesery, Muhammad Muzamal Ashfaq, Yefan Shi, Hu Zicheng & W.G. Alshaer (2021). Analysis of energy and specific energy requirements in various drying process of mint leaves. *Case Studies in*

- Thermal Engineering 26, 101113.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101113>
25. Antia Orphanides, Vlasios Goulas & Vassilis Gekas (2015). *Drying Technologies: Vehicle to High-Quality Herbs*. Springer Science+Business Media New York. DOI 10.1007/s12393-015-9128-9.
 26. Long Xie, A. S. Mujumdar, Hong-Wei Xiao & Zhen-Jiang Gao (2013). *Recent Technologies and Trends in Medicinal Herb Drying*. *Recent Technologies and Trends in Medicinal Herb Drying*. 69-90.
 27. İlhan CEYLAN & Ali Etem GÜREL (2016). Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves. *Applied Thermal Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.077>.
 28. A.K. Babu¹, G. Kumaresan, V. Antony Aroul Raj & R. Velraj (2020). Experimental Investigations of Thin-layer Drying of Leaves in a Heat-Pump Assisted Tray-type Batch Drying Chamber. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 66(2020)4, 254-265. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6510
 29. Hamed Karami, Mansour Rasekh, Yousef Darvishi & Rozhin Khaledi (2017). Effect of Drying Temperature and Air Velocity on the Essential Oil Content of *Mentha aquatica* L. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20:4, 1131-1136, DOI: 10.1080/0972060X.2017.1371647
 30. Mustafa Aktas, Ataollah Khanlari, Burak Aktekeli & Ali Amini (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International journal of hydrogen energy* 42. 18034-18044
 31. Neslihan Colak, Ebru Kuzgunkaya & Arif Hepbasli (2007). Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer. *Journal of Food Process Engineering* 31, 281–298. DOI: [10.1111/j.1745-4530.2007.00155.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00155.x)
 32. Долинский А. А. Оптимизация процессов распылительной сушки / Долинский А. А., Иваницкий Г. К. – Киев: Наукова думка, 1984. – 240 с.

33. Снежкін Ю. Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С. & Дабіжа Н.О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Під ред. академіка НАН України А. А. Долінського ; НАН України, Ін-т техн. теплофізики. – Київ: «Поліграф-Сервіс», 2009. – 104 с.
34. Бурдо О.Г. (2010). Эволюция сушильных установок.
35. Снежкін Ю.Ф. & Петрова Ж.О. (2018). Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини. Київ: Наукова думка. 2018
36. Микола Іванович Погожих & Андрій Олегович Пак (2015). Енергоефективні способи переробки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини
37. Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Б. М. Микичак & О. В. Уткіна (2014). Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. - № 787. - С. 319-323.
38. Малежик, І., Дубковецький, І., & Бурлака, Т. (2017). Визначення основних тепломасообмінних параметрів сушіння культивованих грибів при різних способах енергопідведення. *Scientific Works*, 80(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.223>
39. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Уланов М.М., & Малащук Н.С. (2020). Ефективність використання теплових насосів в процесах сушіння. Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016-2020 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (С. 410-420). Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
40. Перельман В. И. Краткий справочник химика / Перельман В. И. – М.: Государственное научно-техническое изд-во хим. лит-ры, 1954. – 559 с.

41. Горновский И. Т. Краткий справочник химика / Горновский И. Т., Лазаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. – К.: Наукова думка, 1974. – 991 с.
42. Гусарова О.В. Интенсифікація тепломасопереносу під час одержання чіпсів з яблук
43. Полікарбонатний лист SOTON сотовий полікарбонат 4 мм 250x250 мм прозорий [Електронний ресурс] — URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/list-soton-sotovuuy-polikarbonat-250kh250-mm-prozrachnyy.html> (Звернення 22.05)
44. Вентилятор BVN BMFX 125 [Електронний ресурс] — URL: <https://provent.com.ua/product/ventilyator-bmfx-125/> (Звернення 22.05)
45. Электрический нагреватель ВЕНТС НК 100-0,8-1 [Електронний ресурс] — URL: https://ovk.ua/shop/product/vents-nk-100-08-1?gclid=Cj0KCQjw1tGUBhDXARIsAIJx01kW9e0qo_OvQBFv35lscrbnBCUpaIxt1GHСсx0QxDV85yNBMTif3ToaAqujEALw_wcB (Звернення 23.05)
46. Автоматический регистрирующий прибор — потенциометр КСП-4 [Електронний ресурс] — URL: http://standart-m.com.ua/kipia/registratory/pribor-ksm-4_-ksp-4_-ksu-4 (Звернення 22.05)
47. Гельмут Ф., Хайнц-Вернер Ф., Тосіказу Х., Суміо У., Тадао І., Хісая М., Ясухіро Ф., Ханс-Йозеф Б., Доротея Г., Вільфрід П. (2002). «Похідні фенолу». Енциклопедія промислової хімії Ульмана . Вайнхайм: Wiley-VCH. DOI : [10.1002/14356007.a19_313](https://doi.org/10.1002/14356007.a19_313) ISBN 978-3527306732.
48. Pivnenko, K., Pedersen, G. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. Bisphenol A and its structural analogues in household waste paper. Waste Management. 2015. Т.44, С. 39–47. Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.017>. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/118749778/PostPrint_Davidsen_JoH_1.pdf (Звернення 22.05)
49. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.

50. *Лыков А. В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 464 с.
51. Снежкін Ю.Ф. & Дабіжа Н.О. (2000). Исследование адсорбционных характеристик коллоидных капиллярно-пористых материалов с целью определения режимов сушки. Промышленная теплотехника. - 2000. - Т. 22, №3 - С. 26 - 29.
52. *Грег С., Синг К.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
53. *Al-muhtaseb A.H., McMin W.A.M., Magee T.R.A.* Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review // Trans IChemE. – 2002. – V. 80, Part C. – P. 118-128.
54. FAO Statistical Yearbook 2004. Word Food and Agriculture // Word Food and Agriculture Organization of The United Nations. – Roma, 2004.
55. Plant Aquaporins: Their Molecular Biology, Biophysics and Significance for Plant Water Relations / S. D. Tyerman, H. J. Bohnert, C. Maurel, E. Steudle, J. A. C. Smith // J. Exptl. Bot. – 1999. – V. 50. – P. 1055-1071.
56. Dmytrenko N.V., Malashchuk N.S., Dabizha N.O. & Ivanov S.O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves (2022). II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research». September; Valencia, Spain. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-16.09.2022>
57. Дабіжа Н.О., Чалаев Д.М., Малащук Н.С. & Базеев Р.Е. (2021). Экспериментальные исследования теплопередачи в рекуператоре конвективной сушилки. Энергоефективність процесів сушіння. Київ, 245-253. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
58. N.S. Malashchuk, D.M Chalaev., & N.O. Dabizha (2021). Experimental investigation of heat transfer in a recuperator of a convective dryer. SWorldJournal. Болгарія, №8 ч.1. С. 42-49. (Внесок здобувача:

проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

59. Чалаєв Д.М. Розвиток теорії та практики сорбційних і парокомпресійних технологій трансформації теплоти: дис. докт. техн. наук: 22.03.21. Київ, 2021. с. 344.
60. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О. & Малащук Н.С. (2018). Оптимізація температурних режимів роботи теплонасосного агрегату в процесах конвективного сушіння. Збірник матеріалів 5-го Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 26–29 вересня 2018 року, Львів. — Львів : Видавництво Львівської політехніки — С. 156. — (Інноваційні природоохоронні технології. Технології підвищення ефективності використання матеріалів, води та енергії).
61. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки / Ю. Ф. Снежкин, Д. М. Чалаев, В. С. Шаврин, Н. А. Дабизжа, К. А. Гатилов // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: 2007. – Вип.30. – Т.1. – С.185-189. (167 - із дис. Дабіжі)
62. Natalia Dabizha, Yurii Sniezhkin, Djamal Chalaev & Nataliia Malashchuk (2017). Research in low-temperature heat pump drying. 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. – June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. – 433 p.
63. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С. & Дабіжа Н.О. (2009). Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Під ред. академіка НАН України Долінського А.А.: НАН України Ін-т техн. теплофізики. – Київ: «Поліграф-Сервіс» 104 с.
64. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Шапар Р.О., Хавін О.О. & Дабіжа Н.О. (2006). Використання теплових насосів в процесі сушіння Промышленная теплотехника. - 2006. - Т. 28, №2 - С. 106 - 110.

65. Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Дабижка Н.А., Гатилов К.А. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки // Наукові праці ОНАХТ. – Вип.30. – Т.1. – С. 185-189.
66. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Тельніков Є.Я., Вишнівський В.М. & Малащук Н.С. (2023). Ефективна камерна сушарка з тавстоплівковими нагрівальними елементами. Енерготехнології та ресурсозбереження, Том 75, № 2, с. 85 – 96. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень).
67. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.
68. ДСанПІН 3.3.007-98. Положення «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями». Герштун Д., Малащук Н. & Базеєв Р. (2021).
69. An investigation of freezing control strategies for residential air-to-air heat exchangers: RP-543. ASHRAE, Inc., 1989. 95 p.
70. Тези ХХІІІ міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність в ХХІ столітті» 19-20 травня, Київ, с.288. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
71. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Шапар Р.О., Хавін О.О., Дабіжжа Н.О. Використання теплових насосів в процесах сушіння // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 106-110.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Уланов М.М., & Малащук Н.С. (2020). Ефективність використання теплових насосів в процесах сушіння. Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2016-2020 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (С. 410-420). Київ. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
2. Дабіжа Н.О., Чалаєв Д.М., Малащук Н.С. & Базеев Р.Е. (2021). Експериментальні дослідження теплопередачі у рекуператорі конвективної сушарки. Енергоефективність процесів сушіння. Київ, 245-253. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
3. N.S. Malashchuk, D.M Chalaev., & N.O. Dabizha (2021). Experimental investigation of heat transfer in a recuperator of a convective dryer. SWorldJournal. Болгарія, №8 ч.1. С. 42-49. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
4. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Енергоресурсозберігаючі технології зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 43, № 4, с. 7 – 16. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
5. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Дмитренко Н.В. & Малащук Н.С. (2023). Сорбційні та термодинамічні властивості пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння. Теплофізика та Теплоенергетика, Том 45, № 2, с. 5 – 14.

(Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

6. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Тельніков Є.Я., Вишнівський В.М. & Малащук Н.С. (2023). Ефективна камерна сушарка з тавстоплівковими нагрівальними елементами. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, Том 75, № 2, с. 85 – 96. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О. & Малащук Н.С. (2018). Оптимізація температурних режимів роботи теплонасосного агрегату в процесах конвективного сушіння. *Збірник матеріалів 5-го Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 26–29 вересня 2018 року, Львів. — Львів : Видавництво Львівської політехніки — С. 156. — (Інноваційні природоохоронні технології. Технології підвищення ефективності використання матеріалів, води та енергії)* (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
8. Дабіжа Н. О., Снежкін Ю.Ф. & Малащук Н.С. (2019). Конвективне сушіння з використанням теплового насоса. *Збірник наукових праць "ЛОГОΣ" за матеріалами конференції Наукова та міжнародна практика, Бордо, 3 березня 2019. Бордо: ОП «Європейська наукова платформа», с. 73-74.* (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
9. Natalia Dabizha, Yurii Sniezkin, Djamal Chalaev & Nataliia Malashchuk (2019). Research in low-temperature heat pump drying. 2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. – June 24–28th, 2019, Lviv, Ukraine. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 433 p. DOI: <https://doi.org/10.23939/cte2019.01.098>. (Внесок

- здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
10. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О., Малащук Н.С. & Гусарова О.В. (2019). Інтенсифікація тепломасоперенесення при зневодненні термолабільних матеріалів. VI Всеукр. наук.-практ. Конференція «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини», 6–7 червня 2019 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Х. : ХДУХТ, с. 53-54 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
 11. Герштун Д., Малащук Н. & Базеев Р. (2021). Дослідження енергетичних характеристик в полімерному теплообміннику-утилізаторі. Тези XXIII міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність в XXI столітті» 19-20 травня, Київ, с.288 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
 12. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Теплонасосне сушіння лікарських та пряно-ароматичних рослин. Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ. с. 92 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
 13. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Енергоефективна теплонасосна сушарка для зневоднення пряно-ароматичної сировини. Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ. с. 95 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
 14. Dmytrenko N.V., Malashchuk N.S., Dabizha N.O. & Ivanov S.O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves (2022). II International Scientific and Theoretical Conference «Scientific forum: theory and practice of research». September; Valencia, Spain. [DOI:](#)

<https://doi.org/10.36074/scientia-16.09.2022> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

Наукові праці, що додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Снежкін Ю.Ф. & Малащук Н.С. (2019). Низькотемпературне сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Збірник тез доповідей XVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (22-23 квітня 2019 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», с. 21-22 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
16. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжа Н.О., Шапар Р.О. & Малащук Н.С. (2019). Теплонасосна сушильна установка. Матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 15-16 травня, Київ.– К.: Інтерсервіс, С. 621-624 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
17. Dabizha N., Sniezhkin Yu. & Malashchuk N. (2020). Drying performance of thermolabs materials at low temperatures. Abstracts of X International Scientific and Practical Conference «Scientific achievements of modern society» Liverpool, United Kingdom 27-29 May. 121–124 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
18. Дабіжа Н.О., Чалаєв Д.М., Базеєв Р.Є. & Малащук Н.С. (2021). Дослідження полімерного перехреснотічного теплообмінника «повітря-повітря». Тези XII міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 26-27 жовтня, Київ с. 95 (Внесок

здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

19. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2021). Технології сушіння пряно-ароматичних рослин. Тези XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. 24-26 травня, Київ. с.126 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
20. Dabizha N., Sniezhkin Yu. & Malashchuk N. (2021). Technologies for drying spicy-aromatic plants. Тези XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. 24-26 травня, Київ. с.129 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
21. Снежкін Ю.Ф., Дабіжа Н.О. & Малащук Н.С. (2022). Research of dehydration processes of medicinal and spicy-aromatic plants. Тези XIII міжнародної науково-практичної конференції "Modern scientific research Achievements, and development prospects" 19-22 червня, Берлін ст. 5 (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

ЄДРПОУ 35182513
п/р 26004901315762
В ЗАТ «ОТП БАНК» МФО 300528



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«В.Д.Е. - УКРАЇНА»
ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

Україна, Київська обл., м. Бровари,
буль. С. Разіна, 7
+38(044)22-111-88
www.vde.com.ua

№ 114 від 03.09.2020р.

АКТ

випробування теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегата
для конвективної сушарка камерного типу

Інститутом технічної теплофізики НАН України була надана для ТОВ «В.Д.Е.-Україна» конвективна сушарка камерного типу з теплогенеруючим осушуючим теплонасосним агрегатом з метою проведення виробничих випробувань.

В результаті проведених випробувань встановлено, що застосування в конвективній сушарці розробленого Інститутом теплонасосного агрегату дозволяє зменшити енерговитрати на процес сушіння. Енергоспоживання теплового насоса на видалення вологи з сушильного агенту шляхом охолодження повітря і конденсації вологи, що міститься в ньому, склало 0,7-0,9 кВт·год на кг сконденсованої вологи.

Директор ТОВ «В.Д.Е.-Україна»



К.Є.Гурський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ДП

«Інженерний центр «Сушка»

Чернишин О. Г.

_____ 2020 р.

АКТ

промислових випробувань та впровадження теплогенеруючого
теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу

Комісія у складі

голова комісії – Чернишин Олександр Георгієвич, директор ДП «Інженерний
центр «Сушка»;

члени комісії:

– Тельников Євгеній Якович, старший науковий співробітник ДП «Інженерний
центр «Сушка»;

– академік НАН України Снежкін Юрій Федорович, директор Інституту
технічної теплофізики НАН України;

– к.т.н. Уланов Михайло Миколайович, старший науковий співробітник відділу
тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН
України ;

– к.т.н., с.н.с. Чалаєв Джамалутдін Муршидович, старший науковий
співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту
технічної теплофізики НАН України;

– к.т.н. Дабіжа Наталія Олександрівна, старший науковий співробітник відділу
тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН
України

склали цей акт про те, що вищезгадана установка пройшла в 2020 р. виробничі
випробування та тимчасово була впроваджена в ДП «Інженерний центр
«Сушка» в технологічному процесі низькотемпературного сушіння
напівфабрикатів (сирця) керамічних виробів.

В результаті виробничих випробувань встановлено, що застосування запропонованого технологічного обладнання, а саме теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу, що було розроблене в Інституті технічної теплофізики НАН України, дозволяє зменшити енергоємність процесу сушіння. Одержані енергетичні показники роботи теплонасосного агрегату склали в середньому 0,5-0,9 кВт·год на кг випарованої вологи.

Технічне рішення дозволяє скоротити тривалість процесу сушіння на 20 %. Проведення процесу зневоднення на низькому температурному рівні (45-55 °) дозволило отримати готовий продукт високої якості, та за рахунок створення керованих умов технологічного процесу зневоднення, значно (в 1,5-2 рази) зменшити витрати енергії на вилучення вологи.

Голова комісії:

Директор ДП «Інженерний центр «Сушка»



О. Г. Чернишин

Члени комісії:

С.н.с. ДП «Інженерний центр «Сушка»

Є. Я. Тельников

Директор Інституту технічної
теплофізики НАН України
академік НАН України

Ю. Ф. Снежкін

С.н.с. відділу тепломасопереносу
в теплотехнологіях Інституту технічної
теплофізики НАН України, к.т.н.

М. М. Уланов

С.н.с. відділу тепломасообміну
в дисперсних системах Інституту технічної
теплофізики НАН України к.т.н.,

Д. М. Чалаєв

С.н.с. відділу тепломасопереносу
в теплотехнологіях Інституту технічної
теплофізики НАН України, к.т.н.

Н. О. Дабіжа

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України

Ю.Ф. Снежкін
Ю.Ф. Снежкін

2020 р.



АКТ

Про прийняття в експлуатацію дослідно-промислового зразка теплогенеруючого осушуючого теплонасосного агрегату для конвективної сушарки камерного типу.

Підстава: Наказ директора ІТТФ НАН України №. 09-А від 14.02.2019 р. «Про призначення комісії по перевірці знань, ПТЕЕС, ПБЕЕС і ПУЕ з охорони праці, комісії по прийманню експериментальних стендів та установок».

Голова комісії:

заступник директора з наукової праці
чл.-кор. НАН України

А.О. Авраменко

Заступник голови:

зав. відділу ТОЕТ,
чл.-кор. НАН України

Б.І. Басок

Члени комісії:

Заступник директора

І.С. Свіютін

Головний енергетик

А.Ю. Калягін

Провідний інженер з охорони праці

А.Б. Григоревський

Представник профкому Інституту

О.О. Переяславцева

забезпечення загальними та індивідуальними засобами захисту, засобами пожежогасіння задовольняють пред'явленим до них вимогам і забезпечують належні умови праці та захисту обслуговуючого персоналу від шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Прийняти конвективну сушарку камерного типу з теплогенеруючим осушуючим теплонасосним агрегатом в експлуатацію.

Голова комісії:

заступник директора з наукової праці
чл.-кор. НАН України



А.О. Авраменко

Заступник голови:

зав. відділу ТОЕТ,
чл.-кор. НАН України

Б.І. Басок

Члени комісії:

Заступник директора



І.Є. Євсютін

Головний енергетик



А.Ю. Калягін

Провідний інженер з охорони праці



А.Б. Григоревський

Представник профкому Інституту



О.О. Переяславцева