

Омельченко О. В., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та обладнання
Навчально-наукового інституту економіки і торгівлі імені Михайла
Туган-Барановського Криворізького національного університету
ORCID: 0000-0003-0704-5909

Цвіркун Л. О., кандидат педагогічних наук,
доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та обладнання
Навчально-наукового інституту економіки і торгівлі імені Михайла
Туган-Барановського Криворізького національного університету
ORCID: 0000-0002-1879-0608

Перекрест В. В., викладач кафедри загальноінженерних
дисциплін та обладнання
Навчально-наукового інституту економіки і торгівлі імені Михайла
Туган-Барановського Криворізького національного університету
ORCID: 0000-0003-1753-0721

Корінь К. О., здобувачка вищої освіти
Навчально-наукового інституту економіки і торгівлі імені Михайла
Туган-Барановського Криворізького національного університету

УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ПЛОДОВО-ОВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У статті зазначено, що харчова промисловість відіграє ключову роль у світовому попиті на продукти харчування, водночас значно впливаючи на споживання енергії та навколишнє середовище. Тому першочерговим завданням харчової промисловості має бути перехід до зеленого курсу, а саме зменшення або рекуперація відпрацьованого тепла з метою скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів. Аналіз наукових джерел показав, що останнім часом застосовуються енергоефективні технології на основі відновлювальних джерел енергії, а саме теплові насоси у процесі сушіння плодово-овочевої сировини. Здійснено обґрунтування ефективної системи сушіння задля зменшення енергоспоживання, а також для мінімізації погіршення якості висушених продуктів на основі активних методів рекуперації тепла. Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря. Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння – це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря, де циркулює нагріте повітря, яке проходить через сировину, забирає вологу та переносить її до випарника теплового насоса. Дана підсистема розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння. Завдяки цьому сушіння за допомогою теплового насоса може забезпечити високу ефективність та якість отриманої сушеної сировини.

Ключові слова: харчова промисловість, відновлювані джерела енергії, процес сушіння, тепловий насос, плодово-овочева сировина.

Omelchenko O. V., Tsvirkun L. O., Perekrest V. V., Korin K. O. Improving equipment for drying fruit and vegetable raw materials using renewable energy sources

The article states that the food industry plays a key role in the global demand for food products, while significantly affecting energy consumption and the state of the environment. Therefore, the primary task of the food industry should be to transition to a green course, namely, the reduction or recycling of waste heat in order to reduce energy consumption and control green-



house gas emissions. Analysis of scientific sources showed that recently energy-efficient technologies based on renewable energy sources have been used, namely heat pumps in the drying process of plant raw materials. An effective drying system is substantiated to reduce energy consumption, as well as minimize deterioration in the quality of dried products based on active heat recovery methods. A structural diagram of the drying process with a heat pump using forced convection, operating in a closed environment with full recirculation of dried air, is proposed. It is considered appropriate to consider a drying system with a heat pump as an interaction of three subsystems, the first of which is responsible for the drying chamber – a set of elements involved in the movement of air, where heated air circulates, passes through the raw material, picks up moisture and transfers it to the evaporator of the heat pump. This subsystem is considered as an open subsystem due to the exchange of energy with the heat pump. The second subsystem is a closed subsystem operating in a closed air circuit, where only energy exchange in the form of heat occurs through its boundaries, while moist air is not lost, but recirculated. The second subsystem includes a heat pump, the main elements of which are a compressor, condenser, evaporator and expansion valve. The third subsystem provides control of the drying process, which requires the installation of humidity and temperature sensors inside the drying chamber at the inlet to the evaporator and at the outlet from the condenser. The ability to transfer heat from one subsystem to another is a key factor in achieving optimization of energy consumption in the drying process. This allows for high drying efficiency using a heat pump and high quality of the resulting dried raw materials.

Key words: food industry, renewable energy sources, drying process, heat pump, fruit and vegetable raw materials.

Постановка проблеми. Харчова промисловість відіграє ключову роль у світовому попиті на продукти харчування, водночас значно впливаючи на споживання енергії та навколишнє середовище. Традиційні джерела енергії, що використовуються у переробці харчової сировини мають значні екологічні наслідки, включаючи викиди парникових газів та питома енергоспоживання. Інтеграція відновлюваних джерел енергії охоплюють економічні та екологічні аспекти, які сприяють зниженню викидів вуглецю, допомагаючи підприємствам відповідати цілям сталого розвитку [1]. Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, не лише сприяє скороченню використання традиційної енергії в умовах енергетичної кризи, а й зменшує залежність від зростаючого попиту на викопне паливо задля розвитку сталої енергетичної країни.

Першочерговим завданням харчової промисловості має бути перехід до зеленого курсу, а саме зменшення або рекуперация відпрацьованого тепла з метою скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів. Енергетичні та продовольчі системи мають бути трансформовані та відповідати зростаючому попиту, стати більш інклюзивними, безпечними і сталими, щоб відповідати концепції «Європейський зелений курс» [2, 3]. Як відомо на харчові системи припадає близько 30 % загального світового споживання енергії, тому стратегія оптимізації зменшення питомого енергоспоживання має бути впроваджена для таких енергоємних операціях як сушіння плодово-овочевої сировини. Метою якого є зменшення вологості продуктів для забезпечення більш тривалого терміну зберігання харчової сировини. Задля цього необхідно обрати ефективну систему сушіння для зменшення енергоспоживання, а також для мінімізації погіршення якості висушених продуктів на основі активних методів рекуперации тепла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сушіння – це процес видалення води, що міститься у рослинній сировині з метою збільшення його збереженості та стабільності, зменшення ваги та об'єму, а також концентрації смаку та поживних речовин. Сушильне обладнання можна класифікувати за різними критеріями, наприклад, за механізмом сушіння: конвективні сушарки (використовують нагріте, рухоме повітря для видалення вологи із твердого продукту на основі створення контрольованого середовища, де тепле повітря циркулює навколо сировини для прискорення випаровування вологи) [4]; контактні сушарки (засновані на передачі теплоти висушуваному матеріалу внаслідок контакту з нагрітою поверхнею) [5]; сублімаційні сушарки (застосовують принцип швидкого заморожування продукту перед сушінням, коли процес можна розділити на дві стадії: у першій за допомогою глибокого вакууму волога виморожується і виходить на поверхню, у другій – за рахунок інтенсивного підведення тепла здійснюється випаровування вологи (лід, минаючи рідкий стан перетворюється на пару) [5]. Збереження продуктів харчування шляхом сушіння є однією з найдавніших технологій але водночас потребує високих енергетичних витрат, оскільки цей процес, в більшості випадків, базується на випаровуванні вологи, що має надзвичайно високу питому теплоту пароутворення, що потребує використання електричної енергії для генерації тепла.

Останнім часом застосовуються енергоефективні технології на основі відновлюваних джерел енергії, а саме теплові насоси в процесі сушіння плодово-овочевої сировини. Сушіння за допомогою теплового насоса має переваги серед іншого обладнання, бо тепловий насос має здатність відновлювати приховане та відчуте тепло шляхом конденсації вологи з повітря для сушіння. Тепло, що генерується, повторно циркулює назад у сушарку шляхом нагрівання зневодненого повітря для сушіння. Таким чином, енергоефективність значно зростає в результаті відновлення циркулюючого тепла, яке було б втрачено в атмосферу при використанні традиційного обладнання для сушіння [6]. Використання теплових насосів є ефективним для збереження навколишнього середовища, оскільки зменшують використання палива та викиди CO₂, зменшують споживання енергії у порівнянні із традиційними сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи. Мета теплового насоса – підтримувати сировину, що нагрівається при високій температурі шляхом поглинання тепла з джерела із низькою температурою. Основними елементами, що

складають тепловий насос ϵ : компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник. Розташування компонентів сушарки з тепловим насосом наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Розташування компонентів сушарки з тепловим насосом

Тепловий насос має такі основні компоненти [7]:

- компресор – компонент, який вбирає пари холодоагенту під низьким тиском і стискає їх у пару високого тиску та високої температури;
- випарник – компонент, який поглинає тепло поки рідинний холодоагент випаровується у пару;
- конденсатор – компонент, який віддає тепло в навколишнє середовище, внаслідок чого холодоагент змінює свій стан при конденсації;
- розширювальний клапан – компонент, який дає можливість холодоагенту частково розширюватися під час поглинання тепла, що призводить до його охолодження перед входом у випарник;
- чотирьохходовий клапан дозволяє циклу бути зворотним, забезпечуючи подачу холоду або тепла з будь-якої сторони випарника або конденсатора, змінює напрямок холодоагенту, перемикаючи систему між нагріванням та охолодженням.

Сьогодні науковці приділяють увагу комбінованим методам сушіння з використанням теплового насосу. Деякі комбіновані методи, які застосовуються в харчовій промисловості наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Комбіновані методи сушіння з тепловим насосом

Метод сушіння	Характеристика
Поєднання конвективної сушарки з тепловим насосом	Дозволяє створити контрольовані тепловологісні умови сушіння за рахунок утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія [8]. Сприяє покращенню системи конвективної камери сушіння, що зменшує енергоємність процесу; значне підвищення енергетичної ефективності процесу сушіння, можливе при здійсненні глибокої рекуперації теплової енергії з використанням парокompресійних або термоелектричних теплових насосів [9]
Поєднання сушарки з псевдозрідженим шаром з тепловим насосом	Досягає подвійної мети: низькотемпературне та високоефективне сушіння, а також має значні переваги в енергозбереженні та екологічності завдяки замкненому контуру рекуперації енергії в порівнянні з традиційними методами сушіння [10]
Поєднання інфрачервоної сушарки з тепловим насосом	Здійснює інтенсивне вилучення вологи з продукту за рахунок комбінованого використання процесів теплонасосного та інфрачервоного сушіння, що забезпечує зменшення часу сушіння та скорочення загальних енерговитрат [11]. Може вирішити проблеми нерівномірного нагрівання, що підвищує ефективність сушіння, мінімальні втрати тепла та широкий спектральний діапазон випромінювання [10]. Тепловий насос може бути поєднаний з інфрачервоною сушаркою для досягнення високої енергоефективності процесу сушіння [13]
Поєднання мікрохвильової сушарки з тепловим насосом	Завдяки високому коефіцієнту перетворення енергії напрямок теплопередачі як із внутрішньої так і з зовнішньої поверхні сировини відповідає напрямку випаровування води, що уможливує рівномірне мікрохвильове нагрівання [10]. Завдяки швидкому та об'ємному нагріванню технологія є ефективною для сушіння харчових продуктів з дотриманням максимальної енергоефективності та якості висушеного продукту [13]
Поєднання сонячних колекторів з тепловим насосом	Технологія є дуже фундаментальною концепцією, особливо для сушіння. Поєднання сонячного джерела теплової енергії, такого як сонячні теплові колектори і теплового насоса у процесі сушіння сприятиме зниженню експлуатаційних витрат та отриманню продукції високої якості [12]. Основною перевагою системи є перетворення природної енергії, що сприяє значній економії енергії, екологічності процесу, реалізації стратегії керування та вищій робочій температурі, що вирішує проблеми пов'язані з традиційними методами сушіння [13]

На основі аналізу наукових джерел можна констатувати, що традиційні методи сушіння широко використовуються підприємствами харчової промисловості. Проте вони не обладнані засобами рекуперації тепла, тоді як теплові насоси можуть забезпечити дуже ефективний спосіб відновлення як явного так і прихованого тепла. Сушарки з тепловим насосом знайшли своє застосування у сушінні плодово-овочевої сировини завдяки низці переваг, з-поміж яких є те, що метод більш енергоефективний та екологічно чистий, ніж сушарки з прямим нагріванням. Сушіння за допомогою теплового насоса може бути поєднане з сушінням в мікрохвильовій печі, інфрачервоним сушінням, сушінням в псевдозрідженому шарі, сублимаційним сушінням, радіочастотним сушінням та конвективним сушінням для подолання деяких проблем, що виникають у процесі традиційних методів сушіння, а саме зменшення питомого енергоспоживання, високої теплової ефективності, підвищення екологічності завдяки замкненому контуру рекуперації енергії в порівнянні з традиційними методами сушіння.

Мета статті. Метою статті є обґрунтування ефективної системи сушіння задля зменшення енергоспоживання, а також для мінімізації погіршення якості висушених продуктів на основі активних методів рекуперації тепла.

Виклад основного матеріалу. Використання теплових насосів є фундаментальним для збереження навколишнього середовища, оскільки вони зменшують використання палива та викиди CO_2 , зменшують споживання енергії у порівнянні із сушарками, що використовують електричні нагрівальні елементи. Теплові насоси працюють за тим же принципом, що й холодильне обладнання, однак у них зворотний режим роботи. Робота теплового насоса базується на термодинамічному циклі, також відомому як цикл охолодження, що дозволяє передавати тепло з холоднішої області до теплішої або навпаки, забезпечуючи ефективне нагрівання або охолодження. Тепловий насос складається з кількох основних компонентів, які працюють разом у різних фазах. Основними елементами, що складають тепловий насос є: компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник. Потік повітря всередині камери сушіння циркулює через випарник та конденсатор, а вентилятор уможливує створення руху повітря на основі передачі механічної енергії повітрю через ротор, який обертається на високій швидкості і підвищує кінетичну енергію потоку, задля видалення вологого повітря та забезпечення активної циркуляції.

Проте слід зауважити, що процес конвективного сушіння гарячим повітрям при високій температурі знижує поживну та органолептичну якість харчових продуктів. Сушіння за допомогою теплового насоса проходить при низькій температурі з високою поживною та органолептичною якістю та дозволяє здійснювати процес у контрольованих умовах [17]. Сушарки оснащені тепловим насосом виконують свою роботу в закритому циклі, що дозволяє повторно використовувати повітря та частину тепла. Параметрична схема процесу сушіння плодово-овочевої сировини із використанням теплового насоса наведена на рисунку 2.

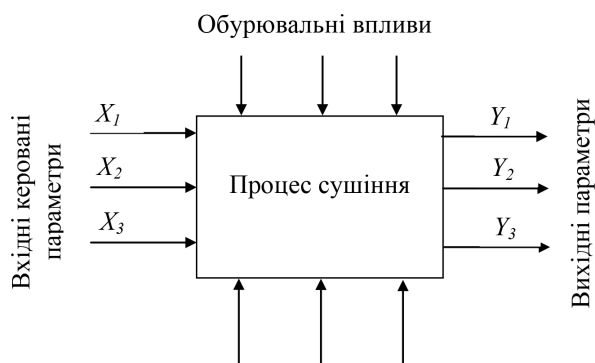


Рис. 2. Параметрична схема процесу сушіння плодово-овочевої сировини із застосуванням теплового насоса

Вхідними параметрами є параметри сушильного середовища:

- X_1 – температура повітря;
- X_2 – відносна вологість повітря;
- X_3 – швидкість циркуляції повітря;
- X_4 – початкова вологість сировини;
- X_5 – електрична енергія;
- X_6 – питома теплоємність сировини.

Вихідними параметрами є характеристики сушильного середовища:

- Y_1 – температура сушіння;
- Y_2 – кінцева вологість сировини;
- Y_4 – питома енергоспоживання;
- Y_5 – кількість виділеного конденсату.

Обурювальні впливи:

- зміни параметрів вхідної сировини;
- технічні та експлуатаційні чинники;
- внутрішні перехідні процеси.

Важливим компонентом теплових насосів є чотириканальний клапан, який дозволяє змінювати цикл та забезпечувати як нагрівання так і охолодження в межах однієї системи. Чотириканальний клапан – це тип соленоїдного клапана, який може змінювати напрямок потоку холодоагенту в системі теплового насоса. Функція реверсу дозволяє тепловому насосу перемикатися між режимами нагрівання та охолодження: у режимі нагрівання клапан направляє теплий холодоагент всередину камери сушіння, а в режимі охолодження направляє холодоагент для поглинання тепла з камери сушіння та виведення його назовні, що дозволяє тепловим насосам змінювати режим роботи забезпечуючи нагрівання або охолодження активуючи бажаний цикл [15]. Тому система теплового насоса оснащена чотириканальним клапаном, що дозволяє змінювати цикл нагрівання на охолодження циклом охолодження на нагрівання, базуючись на часі сушіння плодово-овочевої сировини, кількості вологи, яку можна видалити з продукту без впливу на його якісні характеристики. Використання теплового насоса спрямоване на реалізацію стратегії, що забезпечує нагрівання, охолодження та рекуперацію повітря, що може забезпечити високу ефективність процесу сушіння. Робота теплового насосу в процесі сушіння наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

Робота теплового насосу в процесі сушіння

Цикл нагрівання [14, 16]	Цикл охолодження [14, 16]
<ul style="list-style-type: none">– під час циклу нагрівання тепло забирається з зовнішнього повітря і «перекачується» всередину сушильної камери;– рідкий холодоагент проходить через пристрій розширення, перетворюючись на суміш рідини та пари низького тиску;– холодоагент потрапляє до зовнішньої спіралі, яка виконує функції випарника;– після проходження через випарник холодоагент перетворюється на газ, який подається до компресора, що підвищує тиск і температуру холодоагенту завдяки виконаній роботі;– повністю нагрітий холодоагент передає своє тепло воді в нагрівальному контурі конденсатора;– охолоджуюча рідина втрачає тепло і знову стає рідкою, проходить через розширювальний клапан, що знижує його тиск і дозволяє знову поглинати тепло з повітря	<ul style="list-style-type: none">– система теплового насоса зтягує гаряче повітря у внутрішній блок;– рідина проходить через конденсатор, де тепле повітря всередині сушильної камери засмоктується холодоагентом, а холодоагент перетворюється на газ;– газ проходить через компресор через реверсивний клапан, де підвищує температуру та тиск, а потім переходить у зовнішній блок;– зовнішній пристрій охолоджує гарячий холодоагент, коли він проходить крізь нього;– тепла енергія виділяється в повітря і холодоагент стає рідким; – холодоагент переходить із зовнішнього блоку до внутрішнього, де охолоджується далі

Коли температура в сушильній камері досягне встановленого значення, тепловий насос припиняє роботу, а коли температура в сушильній камері буде нижчою за задану температуру, тепловий насос автоматично активується для нагрівання. Структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря наведено на рисунку 3.

Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря. Тепловий насос підключений до сушарки, що є складною системою через взаємозалежність усіх її елементів, бо будь-яка зміна в одному з компонентів неминуче впливає на інші складники системи. Електрична система керує компресором, вентилятором та налаштуваннями температури для системи теплового насоса, а система теплового насосу працює за принципом рекуперації енергії.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння – це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря, де циркулює нагріте повітря, яке проходить через сировину, забирає вологу та переносить її до випарника теплового насоса. Дана підсистема розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. До її складу входить сушильна камера та вентилятор, що забезпечує створення руху повітря на основі передачі механічної енергії повітряю через ротор, який обертається на високій швидкості і підвищує кінетичну енергію потоку, задля видалення вологого повітря та забезпечення активної циркуляції.

Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник

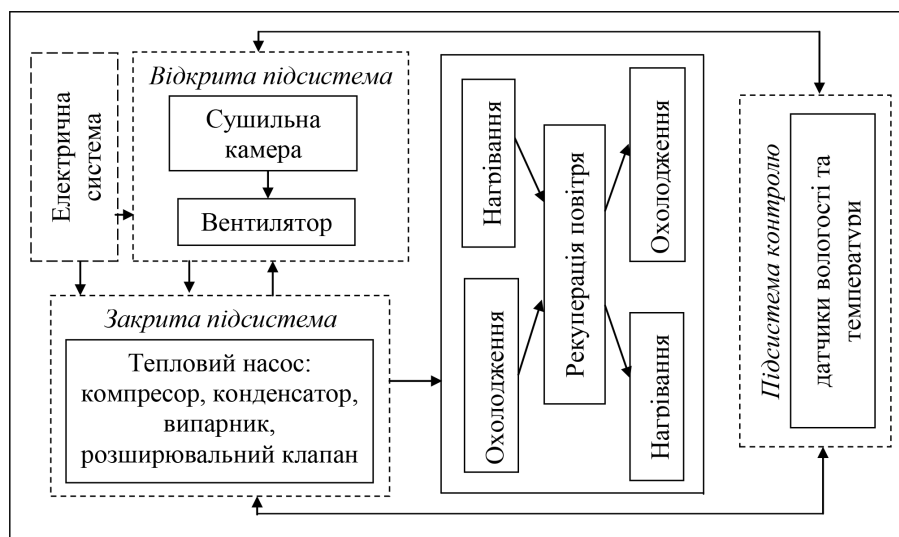


Рис. 3. Структурна схема процесу сушіння з тепловим насосом

та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння. Використання теплового насоса спрямоване на реалізацію стратегії, що забезпечує нагрівання, охолодження та рекуперацію повітря. Завдяки цьому сушіння за допомогою теплового насоса може забезпечити високу ефективність та якість отриманої сушеної сировини.

Висновки. На основі вищезазначеного можна вважати, що харчова промисловість відіграє ключову роль у світовому попиті на продукти харчування, водночас значно впливаючи на споживання енергії та навколишнє середовище. Тому першочерговим завданням харчової промисловості має бути перехід до зеленого курсу, а саме зменшення або рекуперація відпрацьованого тепла з метою скорочення споживання енергії та контролю викидів парникових газів. Зазначено, що останнім часом застосовуються енергоефективні технології на основі відновлюваних джерел енергії, а саме теплові насоси у процесі сушіння плодово-овочевої сировини. Використання теплових насосів є ефективним для збереження навколишнього середовища, оскільки вони зменшують використання палива та викиди CO₂, зменшують споживання енергії у порівнянні із традиційними сушарками.

Здійснено обґрунтування ефективної системи сушіння задля зменшення енергоспоживання, а також для мінімізації погіршення якості висушених продуктів на основі активних методів рекуперації тепла. Використання теплового насоса спрямоване на реалізацію стратегії, що забезпечує нагрівання, охолодження та рекуперацію повітря. Запропоновано структурну схему процесу сушіння з тепловим насосом за допомогою примусової конвекції, що працює у замкнутому середовищі з повною рекуперацією висушеного повітря. Електрична система керує компресором, вентилятором та налаштуваннями температури для системи теплового насоса, а система теплового насосу працює за принципом рекуперації енергії.

Вважається за доцільне розглядати систему сушіння з тепловим насосом, як взаємодію трьох підсистем, перша з яких відповідає за камеру сушіння – це сукупність елементів, що беруть участь у русі повітря, де циркулює нагріте повітря, яке проходить через сировину, забирає вологу та переносить її до випарника теплового насоса. Дана підсистема розглядається як відкрита підсистема через обмін енергією з тепловим насосом. Друга підсистема є закритою підсистемою, що працює у замкнутому повітряному контурі, де існує лише обмін енергією у вигляді тепла через її межі, де вологе повітря не втрачається, а рециркулюється. До складу другої підсистеми входить тепловий насос, основними елементами якого є компресор, конденсатор, випарник та розширювальний клапан. Третя підсистема забезпечує здійснення контролю процесу сушіння, що потребує встановлення датчиків вологості та температури всередині камери сушіння на вході у випарник та на виході з конденсатора. Визначальним фактором є здатність передавати тепло з однієї підсистеми до іншої задля досягнення оптимізації енергії, що використовується у процесі сушіння. Завдяки цьому сушіння за допомогою теплового насоса може забезпечити високу ефективність та якість отриманої сушеної сировини.

Список використаних джерел:

1. Ashtashil V. Bhambulkar, Prasanna Titarmare. Renewable energy integration in food processing facilities: a review // *International journal of food and nutritional sciences*. 2022. Vol. 11. P. 3457–3471.
2. Renewable energy and agri-food systems: advancing energy and food security towards sustainable development goals. URL: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/renewable-energy-agri-food-systems-advancing-energy-food-security-towards-sustainable_en.
3. Цвіркун Л. О., Омельченко О. В., Цвіркун С. Л., Галінтовський В. К. Автоматизація технологічних процесів для досягнення цілей сталого розвитку. *Стратегії та політики ЄС: інституційна структура та механізми реалізації: матеріали II науково-практичної конференції (20–21 березня 2025 року)*. Кривий Ріг: Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського національного університету, 2025. С. 218–220.
4. How convection drying works: from home to industry. URL: <https://engineerfix.com/how-convection-drying-works-from-home-to-industry/>
5. Коробка С. В. Обґрунтування параметрів та режимів роботи геліосушарки фруктів: дис.... канд. техн. наук : 05.05.11 / Коробка Сергій Васильович. Львів, 2016. 295 с.
6. Construcción y pruebas de funcionamiento de un deshidratador por bomba de calor. URL: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/c8b81a7b-5a5b-4475-b4e1-e2f0c8ce34b0/content>
7. Parts of heat pump and functions. URL: <https://www.linqip.com/blog/parts-of-heat-pump/>
8. Снежкін Ю. Ф. Теплонасосна сушильна установка / Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Чалаєв, Н. О. Дабіжа, Р. О. Шапар, Н. С. Малащук. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції* (Київ, 15-16 травня 2019 р.). К. : Інтерсервіс, 2019. С. 621–624.
9. Mazur Oleksandr, Yakubash Ivan. Condensation thermoelectric dryer as the best way of drying fruit raw materials. *Young Scientist*. 2022. № 5(105). P. 5–12.
10. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: a review. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/15/2569>
11. Снежкін Ю. Ф. Енергозберігаючі технології сушіння термолабільних матеріалів / Ю. Ф. Снежкін, Сяун Цзянь, Д. М. Чалаєв, М. М. Уланов, Н. О. Дабіжа. *Тепло- і масообмінні процеси та апарати, теорія та практика сушіння*. 2019. № 4. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.1>
12. Solar assisted heat pump system for high quality drying applications: a critical review. URL: <https://www.academia.edu/97195585/>
13. Mahdi Deymi-Dashtebayaz, Abubakr Mostafa, Mostafa Asadi. Recent developments in heat pump dryers focusing on methods of supplying and reducing their energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13474-0>
14. Componentes clavenecesarios para el funcionamiento de la bomba de calor. URL: <https://www.newntide.com/es/blog/simple-diagrams-and-operation-guide-of-heat-pump/>
15. How a 4-way valve works in heat pumps to optimize heating and cooling. URL: <https://dadimprovement.com/how-4-way-valve-works-heat-pumps-optimize-heating-cooling/>
16. Heating and cooling with a heat pump. URL: <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/energy-star/heating-cooling-heat-pump>
17. Fakhreddin Salehi. Effect of heat pump drying on quality of fruits and vegetables: a review // *International Journal of Fruit Science*. 2021. Vol. 21. P. 546–555. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>

References:

1. Ashtashil, V. Bhambulkar, Prasanna, Titarmare (2022). Renewable energy integration in food processing facilities: a review. *International journal of food and nutritional sciences*. Vol. 11. P. 3457–3471.
2. Renewable energy and agri-food systems: advancing energy and food security towards sustainable development goals. Retrieved from: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/renewable-energy-agri-food-systems-advancing-energy-food-security-towards-sustainable_en.
3. Tsvirkun, L. O., Omelchenko, O. V., Tsvirkun, S. L., Galintovsky, V. K. (2025). Avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh protsesiv dlya dosyahnennya tsiley staloho rozvytku [Automation of technological processes to achieve sustainable development goals]. *Stratehiyi ta politico YES: instytutsiyyna struktura ta mekhanizmy realizatsiyi: materialy II naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (20–21 bereznya 2025 roku)*. Kryvyi Rih : Mykhailo Tuhan-Baranovskyi ESIET KNU, S. 218–220.
4. How convection drying works: from home to industry. Retrieved from: <https://engineerfix.com/how-convection-drying-works-from-home-to-industry/>
5. Korobka, S. V. (2016). Obgruntuvannya parametriv ta rezhymiv roboty heliosusharky fruktiv. [Justification of parameters and operating modes of a solar fruit dryer]. [Dissertation of candidate of technical sciences, Lviv]. 295 s.
6. Construcción y pruebas de funcionamiento de un deshidratador por bomba de calor. Retrieved from: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/server/api/core/bitstreams/c8b81a7b-5a5b-4475-b4e1-e2f0c8ce34b0/content>

-
7. Parts of heat pump and functions. Retrieved from: <https://www.linquip.com/blog/parts-of-heat-pump/>
 8. Snezhkin, Y. F., Chalaev, D. M., Dabyzha, N. O., Shapar, R. O., Malashchuk N. S. (2019). Teplonasosna sushyl'na ustanovka [Heat pump drying unit]. *Vidnovlena enerhetyka ta enerhoefektyvnist' u KHKHI stolitti: materialy KHKH mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (Kyiv, 15–16 travnya 2019 roku). Kyiv : Interservice. S. 621–624.
 9. Mazur, Oleksandr, Yakubash, Ivan (2022). Condensation thermoelectric dryer as the best way of drying fruit raw materials // *Young Scientist*. № 5(105). P. 5–12.
 10. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: a review. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/15/2569>
 11. Snezhkin Yu., F. (2019). Enerhozberihayuchi tekhnolohiyi sushynnya termolabil'nykh materialiv [Energy-saving technologies for drying thermolabile materials] / Y. F. Snezhkin, Xiong Jian, D. M. Chalaev, M. M. Ulanov, N. O. Dabyzha // *Teplo- i masoobminni protsesy ta aparaty, teoriya ta praktyka sushynnya/* № 4. S. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.1>
 12. Solar assisted heat pump system for high quality drying applications: a critical review. Retrieved from: <https://www.academia.edu/97195585/>
 13. Mahdi Deymi-Dashtebayaz, Abubakr Mostafa, Mostafa Asadi (2024). Recent developments in heat pump dryers focusing on methods of supplying and reducing their energy consumption // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13474-0>
 14. Componentes clave necesarios para el funcionamiento de la bomba de calor. Retrieved from: <https://www.newntide.com/es/blog/simple-diagrams-and-operation-guide-of-heat-pump/>
 15. How a 4-way valve works in heat pumps to optimize heating and cooling. Retrieved from: <https://dadimprovement.com/how-4-way-valve-works-heat-pumps-optimize-heating-cooling/>
 16. Heating and cooling with a heat pump. Retrieved from: <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/energy-star/heating-cooling-heat-pump>
 17. Fakhreddin, Salehi (2021). Effect of heat pump drying on quality of fruits and vegetables: a review // *International Journal of Fruit Science*. 2021. Vol. 21. P. 546–555. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026