

УДК 66.047.38:621.577

## ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Снєжкін Ю.Ф., академік НАН України, Сюн Цзянь, Президент компанії «Лотосленд»,  
Чалаєв Д.М., канд. техн. наук, Уланов М.М., канд. техн. наук, Дабіжа Н.О., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.1>

Розглянуті процеси обробки повітря в конвективних теплонасосних сушарках з різними схемами зневоднення сушильного агента. Вивчено можливості використання інфрачервоного випромінювання в поєднанні з тепловим насосом для інтенсифікації процесу низькотемпературного конвективного сушіння.

Рассмотрены процессы обработки воздуха в конвективных теплонасосных сушильках с различными схемами обезвоживания сушильного агента. Изучены возможности использования инфракрасного излучения в сочетании с тепловым насосом для интенсификации процесса низкотемпературной конвективной сушки.

The processes of air treatment in convective heat pump dryers with various schemes of drying agent dehumidification are considered. The possibilities of using infrared radiation in combination with a heat pump to intensify the process of low-temperature convective drying are studied.

Бібліографія 15, рис. 4.

**Ключові слова:** комбіноване сушіння, тепловий насос, рекуперація тепла, коефіцієнт перетворення.

$T$  – температура,  $K$ ;

$COP$  – коефіцієнт перетворення;

$SEC$  – питома енергоспоживання;

$SMER$  – питома інтенсивність вилучення вологи;

ІЧ – інфрачервоний;

ТН – теплонасосний.

Процеси сушіння сільськогосподарської продукції за допомогою конвективних сушарок широко застосовуються в агропромисловому комплексі та в харчовій промисловості. Принцип дії конвективних сушарок полягає в обдуванні матеріалу відносно сухим нагрітим повітрям. Зволене повітря вилучається з сушарки і замінюється еквівалентним об'ємом свіжого повітря, яке попередньо нагрівається з метою підвищення його здатності поглинати вологу. Сушіння є енергоємним і тривалим процесом, тому питання інтенсифікації тепломасообміну та зниження енергоспоживання у процесах сушіння становить значний науково-технічний інтерес. Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є оснащення конвективних сушарок енергозберігаючими системами підготовки сушильного агента з використанням теплонасосних циклів [1].

Тепловий насос за своїм принципом дії добре пристосований до інтеграції в процес конвективного сушіння, оскільки низькопотенційна теплота, яка необхідна для його роботи, утворюється в самій сушарці. Так в публікаціях, присвячених теплонасосному сушінню, викладені результати досліджень щодо ефективності застосування теплових насосів в камерних і тунельних сушарках [2], в сушарці з псевдозрідженим шаром [3],

у вакуум-сублімаційній сушарці [4], запропонована сушарка з термохімічним тепловим насосом [5]. Вибір типу теплового насоса (сорбційний або компресійний) для конкретного проекту конвективної сушарки залежить від багатьох факторів, але вирішальним, як правило, є наявність того чи іншого виду енергоресурсів – електрики, теплової енергії, вторинних енергоресурсів або альтернативних джерел енергії. Тому, при розрахунку технологічних схем з різними типами теплових насосів враховують не тільки енергетичну ефективність робочого циклу теплового насоса, але й споживання первинного палива, яке витрачається для отримання цієї енергії. Аналіз публікацій показує, що переважна більшість робіт пов'язана із застосуванням пароконпресійних теплових насосів з електроприводом для низькотемпературних процесів сушіння через їхнє найбільше поширення та простоту організації систем з їхнім використанням.

Звичайна конструкція пароконпресійного теплового насоса включає чотири головні компоненти: компресор, конденсатор, випарник та дросельний вентиль. Ці елементи утворюють схему замкнутого циклу для технологічної рідини, наприклад, фреону, який випаровується у випарнику, потім стискається в компресорі та конденсується у конденсаторі. Таким чином,

підводячи теплоту до випарника на низькому температурному рівні та витрачаючи зовнішню енергію у компресорі, ми одержуємо в конденсаторі теплоту на більш високому температурному рівні, ніж мали у випарнику, та в кількості, яка дорівнює сумарним витратам енергії електродвигуна і джерела низькотемпературної енергії. Оснащення конвективної сушильної установки тепловим насосом дозволяє здійснювати утилізацію теплоти вологого повітря, що йде з сушарки, з наступним поверненням її в процес сушіння на більш високому температурному рівні. Цей напрям є найбільш перспективним для інтенсифікації процесів тепломасообміну при низькотемпературному зневодненні термолабільних матеріалів, оскільки він забезпечує збільшення рушійної сили процесу за рахунок зниження вологовмісту сушильного агента, значно (в 2...2,5 рази) знижує витрати первинної енергії на вилучення вологи та створює добре контрольовані умови зневоднення незалежно від стану навколишнього середовища.

В залежності від схеми підключення теплові насоси, які використовуються в конвективних сушарках, можливо розподілити на два типи – рекуперативні та конденсаційні (збезводнюючі). Рекуперативні теплові насоси використовуються в сушарках, де має місце одноразове проходження повітря крізь продукт. Тепловий насос регенерує теплоту відпрацьованого теплоносія, при цьому випарник теплового насосу підключений до виходу вологого відпрацьованого повітря, а конденсатор – до входу свіжого повітря. Недоліком такого типу сушарок є залежність ефективності їхньої роботи від вологовмісту атмосферного повітря, тому що тепловий насос нагріває, але не осушує повітря, що подається до сушарки.

Для оцінювання енергетичної ефективності теплонасосної сушарки з рекуперативним тепловим насосом прийнято використовувати такі характеристики:

- кількість вологи, що видаляється за одиницю часу. Ця характеристика, за суттю, є продуктивністю сушарки по випаровуваній волозі;

- витрата енергії на привод теплового насоса, яка визначається величиною коефіцієнту перетворення (coefficient of performance, *COP*) і залежить від різниці температур між вхідним та вихідним потоками повітря:

$$COP = \frac{T_{\text{конденсатора}}}{T_{\text{конденсатора}} - T_{\text{випарника}}} \quad (1)$$

Вираз (1) показує максимальну теоретичну ефективність теплового насоса при здійсненні циклу

Карно. На практиці фактична ефективність теплового насоса зазвичай становить від 40 до 50 % від теоретичної ефективності Карно [6].

Другий тип – збезводнюючі теплові насоси, – використовуються в сушарках з замкнутою циркуляцією сушильного агента. Вилучення вологи з сушарки здійснюється шляхом охолодження вологого повітря і конденсації водяної пари на холодній поверхні випарника теплового насоса. У збезводнюючих теплових насосах величина коефіцієнта перетворення вже не може бути показником ефективності системи, оскільки тепловий насос, що охолоджує і нагріває потоки повітря при малих різницях температур, може мати високий коефіцієнт перетворення і без конденсації водяної пари з сушильного агента. Тому ефективність збезводнюючого теплового насоса визначається витратами енергії на 1 кг вилученої з продукту вологи.

Показником ефективності збезводнюючого теплового насоса є питома інтенсивність вилучення вологи (Specific Moisture Extraction Rate, *SMER*), яка визначається як кількість випаровуваної з матеріалу вологи, що приходить на одиницю підведеної енергії:

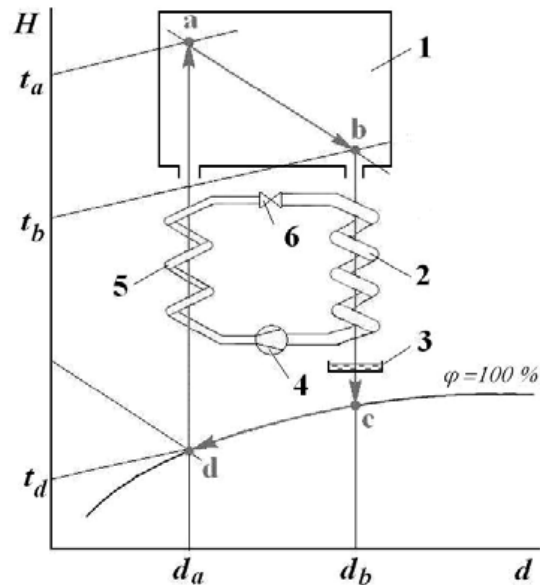
$$SMER = \frac{\text{вилучена волога}}{\text{підведена енергія}}, \text{ кг/кВт}\cdot\text{год.} \quad (2)$$

*SMER* є єдиною характеристикою, яка зв'язує сушарку і теплонасосну систему і відображає наскільки ефективно використовується енергія.

Відповідно, для порівняння енергетичної ефективності різних типів сушарок використовують параметр питомого енергоспоживання (Specific Energy Consumption, *SEC*), який визначається як кількість енергії, витраченої на випаровування 1 кг вологи, і є зворотною величиною до *SMER*.

Значення *SMER* залежить від температури і вологості повітря в сушильній камері, робочої температури випарника і конденсатора і загальної ефективності теплонасосного циклу, причому для кожного конкретного тепловологісного стану повітря існує оптимальний температурний режим збезводнення повітря, який забезпечує максимальну ефективність процесу, тобто мінімальні витрати енергії на вилучення вологи [6, 7].

Процес конвективного сушіння із застосуванням теплонасосного конденсаційного агрегату схематично показаний на рис. 1. Цикл сушіння здійснюється таким чином: нагріте і осушене повітря (стан *a*) надходить до сушильної камери 1, де, проходячи над шаром висушуваного матеріалу, адіабатично зволожується і



**Рис. 1.** Процес теплонасосного сушіння в  $H-d$  діаграмі: 1 – сушильна камера; 2 – випарник; 3 – збірник конденсату; 4 – компресор; 5 – конденсатор; 6 – дросель.

оохолоджується (стан  $b$ ). Зволожено повітря осушується у випарнику теплового насоса 2 за рахунок охолодження (процес  $b-c-d$ ) до заданої температури точки роси (стан  $d$ ), при цьому волога, що міститься в повітрі, конденсується, і вода виводиться до збірника конденсату 3. Далі холодне осушене повітря нагрівається в конденсаторі теплового насоса 4 (процес  $d-a$ ) і повертається до сушильної камери 1.

Таким чином, волога, що вилучається з матеріалу, не виноситься сушильним агентом в оточуюче середовище, як це має місце в традиційних конвективних сушарках, а конденсується на холодній поверхні випарника теплового насоса і вилучається в скрапленому вигляді. Тобто з'являється можливість утилізувати теплоту конденсації та повернути її в процес сушіння на більш високому температурному рівні, що суттєво впливає на енергоспоживання сушарки. Таким чином, під час роботи за замкненим циклом з повним поверненням відпрацьованого сушильного агента не відбувається викиду вологого нагрітого повітря в атмосферу, що забезпечує екологічну чистоту та безпеку сушарки.

Можливість знижувати вологовміст сушильного агента під час низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів сприяє інтенсифікації вологовидалення за рахунок підвищення масообмінного напору між теплоносієм і матеріалом. Крім того технологія сушіння з тепловим насосом забезпечує зниження питомих енерговитрат шляхом керованого осушення теплоносія.

Зневоднення теплоносія в теплонасосному агрегаті може бути здійснено такими шляхами:

1) після проходження над висушуваним продуктом (процес  $a-b$ ) весь потік зволоженого теплоносія охолоджується у випарнику теплового насоса (процес  $b-c-d$ ) до заданої температури точки роси (стан  $d$ ), після чого осушений теплоносій нагрівається в конденсаторі теплового насоса (процес  $d-a$ ) і повертається до сушильної камери (рис. 2, а);

2) теплоносій, який пройшов над висушуваним продуктом, (процес  $a-b$ ) розділяється на два потоки, один з яких піддається глибокому охолодженню (процес  $b-c-d$ ), після чого змішується з частиною вологого теплоносія, що залишилася (процеси  $d-e$  і  $b-e$ ), і в стані  $e$  надходить на нагрівання до конденсатора теплового насоса (процес  $e-a$ ) (рис. 2, б);

3) після адіабатичного зволоження теплоносія (процес  $a-b$ ) і охолодження його частини до стану  $d$  аналогічно попередньому варіанту, холодний осушений потік вступає в теплообмін з потоком, що надходить на охолодження (процеси  $d-d'$  і  $b-b'$ ), і після змішування з частиною вологого теплоносія (процеси  $d'-e$  і  $b-e$ ) в стані  $e$  подається на нагрівання до конденсатора теплового насоса (процес  $e-a$ ) (рис. 2, в).

Як видно з діаграм, у всіх варіантах, незалежно від режиму видалення вологи, здійснюється однаковий ступінь осушення теплоносія. Проте це не означає, що енерговитрати на осушення також будуть однакові – залежно від співвідношення температур у випарнику і

конденсаторі тепловий коефіцієнт циклу і, відповідно, витрата енергії на привод теплового насоса в даних випадках може значно розрізнятися. У зв'язку з цим, з метою оптимізації процесу сушіння, становить інтерес порівняти дані режими осушення за енерговитратами. Розрахункові величини енерговитрат на видалення вологи з повітря різного температурно-вологісного стану

надані на рис. 3. Розрахунки виконані з використанням робочих характеристик теплонасосного агрегату на холодоагенті R-134a. Як видно з графіків, найбільш економічним є процес зневоднення повітря в сушарці шляхом глибокого охолодження частини потоку з подальшою рекуперацією холоду (рис. 3, в).

За аналізом праць, присвячених дослідженню та

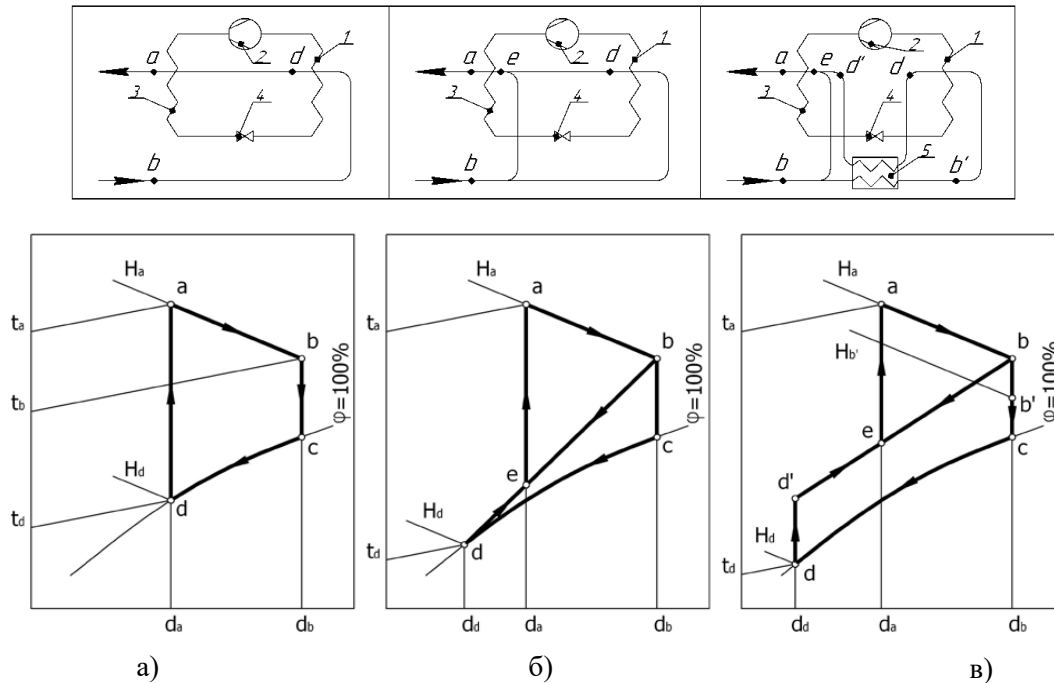


Рис. 2. Схеми зневоднення теплоносія в теплонасосних сушарках і процес обробки повітря в H-d діаграмі з осушенням усього теплоносія (а), з осушенням частини теплоносія (б), з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду (в):

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

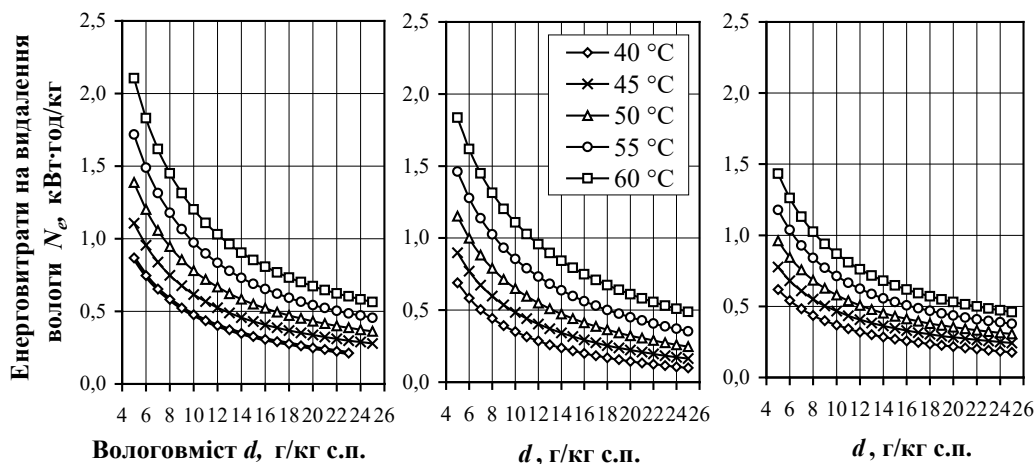


Рис. 3. Залежність енерговитрат на видалення вологи від режиму осушення теплоносія: а) з осушенням усього теплоносія; б) з осушенням частини теплоносія; в) з осушенням частини теплоносія і рекуперацією холоду.

розробці теплонасосних сушильних установок, можна зробити висновок про те, що одним із перспективних напрямків конвективного сушіння термолабільних матеріалів є застосування теплових насосів. Інтеграція теплового насоса в цикл конвективної сушарки дозволяє за рахунок конденсації водяної пари і примусового осушення повітря підтримувати необхідні тепловологісні параметри сушильного агента незалежно від умов навколишнього середовища та створювати керовані умови технологічного процесу зневоднення, що гарантує високу якість готового продукту.

Основні переваги теплонасосного сушіння – висока ефективність використання енергії, контрольовані тепловологісні умови сушіння, висока якість одержаного продукту, екологічна чистота технологічного процесу. В той же час, поряд із зазначеними перевагами, технологія конвективного сушіння з використанням теплового насоса має ряд недоліків, головним з яких є велика тривалість процесу через обмеження за температурою сушіння – температура сушильного агента не перевищує 50-60 °С. При цьому, через високу сухість сушильного агента, висушуваний матеріал в періоді постійної швидкості сушіння через випарне охолодження не розігрівається вище за температуру мокрого термометра, яка становить 25-30 °С. Для того, щоб скоротити час теплонасосного сушіння, систему необхідно забезпечити додатковим джерелом енергії для нагрівання матеріалу. Ефективним шляхом вирішення цього завдання є застосування комбінованого радіаційно-конвективного методу сушіння з використанням енергії інфрачервоного випромінювання.

Конвективне сушіння з інфрачервоним нагріванням продукту є достатньо відпрацьованою технологією. Експериментальні дослідження інфрачервоного сушіння різних харчових продуктів, включаючи овочі, були опубліковані Гінзбургом ще в 1966 році [8]. В теперішній час інфрачервоне нагрівання широко застосовується при сушінні термолабільних матеріалів. Перевагою цього методу нагріву є те, що інфрачервоне випромінювання поглинається не тільки поверхнею матеріалу, але і проникає всередину продукту на глибину, яка залежить від характеристик матеріалу, що нагрівається, і довжини хвилі інфрачервоного випромінювання. При цьому енергія підводиться безпосередньо до матеріалу, тобто передається від нагрівального елемента до поверхні продукту без нагрівання навколишнього повітря [9].

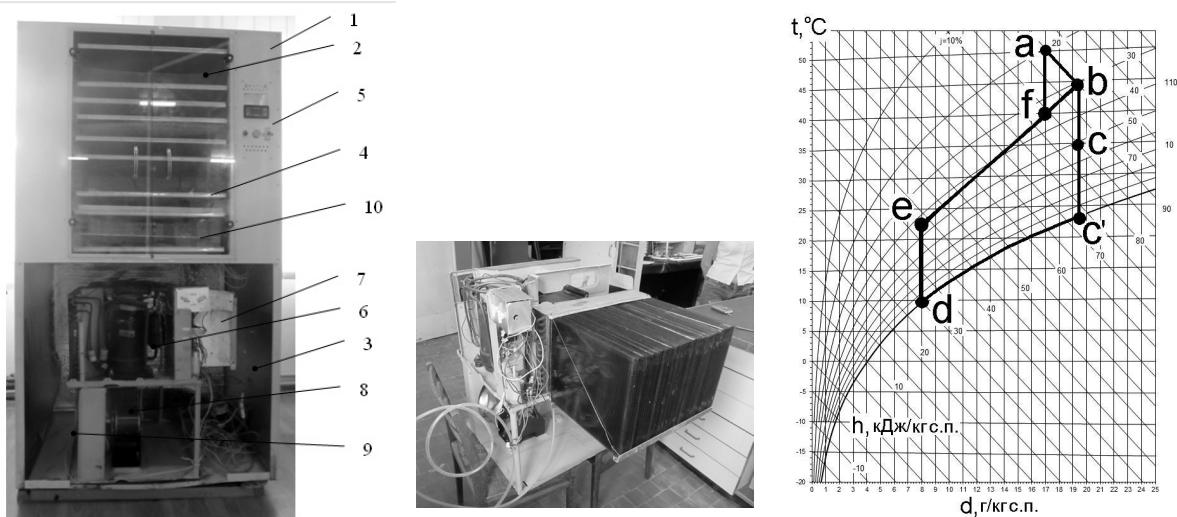
Останніми роками значно зросла зацікавленість дослідників до вивчення комбінованих процесів сушіння з використанням теплових насосів спільно з інфрачервоними випромінювачами. Так, наприклад,

дослідження комбінованого конвективно-радіаційного сушіння сировини рослинного та тваринного походження походились в Польщі [10], Таїланді [11], Китаї [12, 13], Туреччині [14]. Досліджувалися випромінювачі різної потужності, які випромінюють в дальній ІЧ області спектра, в результаті було встановлено, що зі збільшенням потужності, що підводиться до ІЧ-нагрівачів, загальне енергоспоживання зменшується за рахунок прискорення процесу сушіння, а ІЧ сушіння сприяє створенню більш пористої структури в сушеному продукті, що дозволяє отримати продукт з меншою усадкою і поліпшеною регідратацією. Аналіз публікацій свідчить, що при сушінні в комбінованому режимі майже вдвічі зменшується тривалість процесу і на третину витрати енергії в порівнянні з конвективним сушінням. Більшість авторів досліджень роблять загальний висновок, що поєднання процесів теплонасосного та інфрачервоного сушіння забезпечує синергетичний ефект, який приводить до скорочення часу сушіння і зменшення енергоспоживання, а також дозволяє отримати сушені продукти кращої якості.

Комбіновані методи сушіння сільськогосподарської продукції мають великий потенціал, але незважаючи на величезні переваги, ці технології недостатньо вивчені. Для створення комбінованих сушарок промислового та комерційного призначення необхідні додаткові дослідження з розроблення режимів сушіння, які забезпечують якість продукту і збереження поживних речовин при сушінні термолабільних матеріалів.

За результатами досліджень впливу тепловологістних характеристик сушильного агента на інтенсифікацію конвективного низькотемпературного процесу зневоднення термолабільних матеріалів та якість кінцевого продукту в ІТТФ НАНУ розроблена енергоефективна технологія сушіння з змінюваним вологовмістом сушильного агента [15] та розроблена схема включення теплонасосного агрегату в систему конвективної сушильної установки для зневоднення ККП матеріалів. Конвективна сушарка з теплонасосною системою підготовки теплоносія та процес сушіння в *H-d* діаграмі показані на рис. 4. Сушарка обладнана плоскими темними ІЧ-нагрівачами з метою дослідження процесу сушіння термолабільних матеріалів з застосуванням додаткового інфрачервоного нагріву.

Дослідження проводяться в рамках спільного україно-китайського науково-дослідного проекту «Дослідження процесів тепломасопереносу в процесах сушіння рослинної сировини з використанням синергетичного ефекту застосування теплонасосних та електrofізичних технологій».



**Рис. 4.** Експериментальна теплонасосна сушильна установка (а), рекуперативний теплообмінник (б) та процес теплонасосного сушіння в  $h-d$  діаграмі (в): 1 – корпус сушарки; 2 – сушильна камера (технологічний відсік); 3 – агрегатний відсік; 4 – піддон; 5 – пульт керування сушарки; 6 – теплонасосний агрегат; 7 – рекуператор; 8 – циркуляційні вентилятори; 9 – стартовий електронагрівач; 10 – ІЧ-нагрівач.

### Висновки

Застосування теплових насосів в процесах низькотемпературного конвективного сушіння дозволяє підтримувати в сушильній камері необхідні тепловологісні параметри сушильного агента за рахунок примусового осушення повітря та створювати керовані умови технологічного процесу зневоднення незалежно від умов навколишнього середовища, що гарантує високу якість готового продукту.

Інтенсивність вилучення вологи з продукту при низькотемпературному зневодненні термолабільних матеріалів може бути істотно підвищена за рахунок комбінованого використання процесів теплонасосного та інфрачервоного сушіння. Це забезпечує зменшення часу сушіння і скорочення загальних енерговитрат на процес.

### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Chua K.J., Chou S.K. A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying / Applied Thermal Engineering. – 2005. – № 25. – P. 1363-1379.

3. Alves-Filho O., Strømmen I. The Application of Heat Pump in Drying of Biomaterials // Drying Technology. – 1996. – V. 14, № 9. – P. 2061-2090.

4. Artnaseaw A., Theerakulpisut S., Benjariyaporn C. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli // Biosystems Engineering. – 2010. – V. 105, № 1. – P. 130-138.

5. Ogura H., Ishida H., Kage H., Mujumdar A.S. Enhancement of Energy Efficiency of a Chemical Heat Pump-Assisted Convective Dryer // Drying Technology. – 2003. – V. 21. – P. 279-292.

6. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т. 39, № 3. – С. 39-44.

7. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Дабіжжа Н.А., Гатилов К.А. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки // Наукові праці ОНАХТ. – Вип.30. – Т.1. – С. 185-189.

8. Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 407 с.

9. Завалий А.А., Снежкін Ю.Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабільных материалов. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 264 с.

10. Nowak D., Lewicki P. Infrared drying of apple slices // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2004. – № 5. – P. 353-360.
11. Nathakaranakule A., Jaiboon P., Soponronnarit S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit // *Journal of Food Engineering*. – 2010. – V. 100. – № 4. – P. 662-668.
12. Deng Y., Wu J., Su S. Q., Liu Z. D., Ren L., Zhang Y. L. Effect of far-infrared assisted heat pump drying on water status and moisture sorption isotherm of squid (*Illex illecebrosus*) fillets // *Drying Technology*. – 2011. – V. 29. – № 13. – P. 1580-1586.
13. Song X., Hu H., Zhang B. Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump // *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. – 2018. – № 17. – P. 290-296.
14. Aktas M., Sevik S., Aktekel B. Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – V. 113. – № 1. – P. 82-94.
15. Дабижка Н.А. Энергоэффективная технология сушки термолабильных материалов с использованием тепловых насосов / *Наукові праці ОНАХТ*. – Вип. 39. – Т. 2. – С. 341-345.

## ENERGY SAVING TECHNOLOGIES FOR DRYING OF HEAT-SENSITIVE MATERIALS

**Snizhkin Yu.F., Xiong Jian, Chalaev D.M., Ulanov M.M., Dabizha N.O.**

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.1>

The promising development of convective drying of thermolabile materials is the use of heat pumps. The main advantages of heat pump drying are high energy efficiency, controlled thermal conditions of drying, high quality of the final product, environmental cleanliness of the technological process.

The processes of air treatment in convective heat pumps with different schemes of dehydration of the drying agent are considered in the paper. As determined, the main disadvantage of heat pump drying is the long duration of the process due to the drying temperature limitation not exceeding 50–60 °C, and the dried material is not initially heated above the temperature of the wet thermometer, which is 25–30 °C.

The possibility of using infrared radiation in combination with a heat pump was studied to intensify the process of low-temperature convective drying. It is shown that the combination of heat pump and infrared drying processes provides a synergistic effect, which leads to a shorter drying time and reduced energy consumption, as well as to obtain better quality dried products.

References 15, figures 4.

**Key words:** combined drying, heat pump, heat recovery, coefficient of performance.

1. *Snizhkin Yu.F., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Shapar R.O., Khavin O.O., Dabizha N.O.* Vykorystannia teplovykh nasosiv v protsesakh sushinnia [Heat pump application in drying], *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2006. V. 28. № 2. P. 106–110. (Ukr.)

2. *Chua K.J., Chou S.K.* A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying, *Applied Thermal Engineering*. 2005. № 25. P. 1363–1379.

3. *Alves-Filho O., Strømmen I.* The Application of Heat Pump in Drying of Biomaterials, *Drying Technology*, 1996. – V. 14. № 9. P. 2061–2090.

4. *Artnaseaw A., Theerakulpisut S., Benjapiyaporn C.* Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli, *Biosystems Engineering*, 2010. V. 105. № 1. P. 130–138.

5. *Ogura H., Ishida H., Kage H., Mujumdar A.S.* Enhancement of Energy Efficiency of a Chemical Heat Pump-Assisted Convective Dryer, *Drying Technology*, 2003. V. 21. P. 279–292.

6. *Snizhkin Yu.F., Chalaev D.M., Dabizha N.O.* Analiz enerhetychnykh pokaznykh protsesa teplonasosnoho sushynnia [Analysis of energy performance of heat pump drying], *Promyshlennaia teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2017. V. 39. № 3. C. 39–44. (Ukr.)

7. *Snizhkin Yu.F., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Dabizha N.O., Gatilov K.O.* Effektivnost primeniia teplovikh nasosov v protsessakh konvektivnoi sushki [Efficiency of using heat pumps in convective drying processes], *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Proceedings of ONAFT], 2007. S. 30. V.1. P. 185–189. (Rus.)

8. *Ginsburg A. S.* Infrakrasnaya tekhnika v pishchevoy promyshlennosti [Infrared technology in the food industry], Moscow, Food industry, 1966. 407 c. (Rus.)

9. *Zavaliy O.O., Snizhkin Yu.F.* Razrabotka i teplovoe modelirovaniye ustroystv infrakrasnoy sushki termolabilnykh materialov [Development and thermal modeling of infrared drying devices for heat-sensitive materials], Simferopol, ARIAL, 2016. 264 c. (Rus.)

10. *Nowak D., Lewicki P.* Infrared drying of apple slices, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2004. № 5. P. 353–360.

11. *Nathakaranakule A., Jaiboon P., Soponronnarit S.* Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit, *Journal of Food Engineering*, 2010. V. 100. № 4. P. 662–668.

12. *Deng Y., Wu J., Su S. Q., Liu Z. D., Ren L., Zhang Y. L.* Effect of far-infrared assisted heat pump drying on water status and moisture sorption isotherm of squid (*Illex illecebrosus*) fillets, *Drying Technology*, 2011. V. 29. № 13. P. 1580–1586.

13. *Song X., Hu H., Zhang B.* Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2018. № 17. P. 290–296.

14. *Aktas M., Sevik S., Aktekel B.* Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying, *Energy Conversion and Management*, 2016. V. 113. № 1. P. 82–94.

15. *Dabizha N.O.* Energoeffektivnaia tekhnologiya sushki termolabilnykh materialov s ispolzovaniem teplovikh nasosov [Energy-efficient drying technology of thermolabile materials with using heat pumps], *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Proceedings of ONAFT], 2011. S. 39. V. 2. P. 341–345. (Rus.)

Отримано 20.11.2019

Received 20.11.2019