

УДК 664.8.72

СНЕЖКІН Ю.Ф., ЧАЛАЄВ Д.М., ШАВРІН В.С.,
ШАПАР Р.О., ХАВІН О.О., ДАБІЖА Н.О.*Інститут технічної теплофізики НАН України*

ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У ПРОЦЕСАХ СУШІННЯ

Наведено результати аналітичних та експериментальних досліджень процесів зневоднення термолабільних матеріалів у замкнутому циркуляційному контурі з примусовим осушуванням сушильного агента та застосуванням парокompресійного теплонасосного обладнання.

Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований процессов обезвоживания термолабильных материалов в замкнутом циркуляционном контуре с принудительным осушением сушильного агента и с применением парокompрессионного теплонасосного оборудования.

We describe the results of analytical and experimental investigations into the process of dehydration of thermosensitive materials in a closed circulation loop with forced dehumidification of the drying agent and using vapor-compression heat-pump systems.

J – інтенсивність сушіння;
 W – вологість матеріалу;

φ – відносна вологість повітря;
 τ – час.

Низькотемпературне зневоднення термолабільних матеріалів – довготривалий енергоємний технологічний процес, який широко застосовується у хімічній, мікробіологічній та харчовій галузях промисловості. Тому питання інтенсифікації процесів тепломасообміну та зниження енергоспоживання у процесах сушіння становить значний науково-технічний інтерес. В переважній більшості з метою низькотемпературного зневоднення сировини використовують сублімаційне або вакуумне сушіння, проте це потребує значних капіталовкладень, витрат дефіцитної електроенергії та залучення кваліфікованого персоналу для обслуговування складного енергонасиченого обладнання. В той же час для ефективного низькотемпературного зневоднення термолабільних матеріалів можливо застосувати теплонасосні конвекційні сушарки з замкнутим циркуляційним контуром і примусовим зневодненням сушильного агента. Цей напрям є найбільш перспективним на шляху інтенсифікації процесів тепломасообміну та енергозбереження при сушінні 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 кілограм вилученої вологи та створює добре контрольовані умови зневоднення незалежно від стану навколишнього середовища, в першу чергу вологовмісту повітря.

Враховуючи актуальність енергозбереження і стали необхідність покращення якості кінцевої продукції, чимало дослідників вказують на виняткові можливості застосування теплових насосів в процесах зневоднення термолабільних матеріалів при виробництві харчових продуктів та фармацевтичних засобів, в тому числі і харчових порошоків [1, 2].

Звичайна конструкція компресійного теплового насосу 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.

Ефективність теплонасосного циклу звичайно характеризується коефіцієнтом перетворення і залежить від різниці температур між вхідними та вихідними потоками теплоносія. В зневоднюючих теплових насосах або теплонасосних сушарках коефіцієнт перетворення вже не може бути показником ефективності процесу, оскільки можливі режими роботи, при яких тепловий насос матиме високий коефіцієнт перетворення без вилучення водяної пари, що є неприпустимим в процесах зневоднення. Тому енергетична ефективність зневоднюючого теплового насоса повинна характеризуватися кількістю вилученої вологи в кілограмах на кіловат-годину споживаної енергії. В процесі сушіння величина поточних енерговитрат значною мірою залежить від вологовмісту сушильного агента і температурного режиму його зневоднювання. Чим вищий вологовміст сушильного агента, тим менші питомі енерговитрати на вилучення вологи. Крім того, для кожного заданого тепловологісного стану повітря існує оптимальна температура охолодження, при якій питомі енерговитрати мінімальні [3].

Істотно впливає на тривалість процесу зневоднення температура сушильного агента. Підвищенням температури досягається інтенсифікація сушіння, час теплового впливу зводиться до мінімуму, що забезпечує економічність процесу. Однак, можливості інтенсифікації конвективного сушіння термолабільних матеріалів за рахунок підвищення температурного рівня процесу лімітовані, оскільки це суттєво впливає на якість кінцевого продукту.

Другим чинником, здатним впливати на інтенсивність процесу тепломасопереносу, є вологовміст сушильного агента. Найбільш помітно виявляється вплив вологовмісту на інтенсивність процесу при низькотемпературному зневодненні. Встановлено (рис. 1), що при зниженні вологовмісту сушильного агента з 15 до 10 г/кг сухого повітря при температурі матеріалу 45 °С інтенсивність процесу сушіння збільшується на 25 %, а подальше зниження вологовмісту до 8 г/кг сухого повітря забезпечує зростання інтенсивності на 35 % [4].

Технологія зневоднення більшості термолабільних матеріалів потребує жорстких обмежень не тільки температурного рівня процесу, а й збалансування швидкості відведення вологи з зовнішньої поверхні матеріалу із швидкістю дифузії вологи в

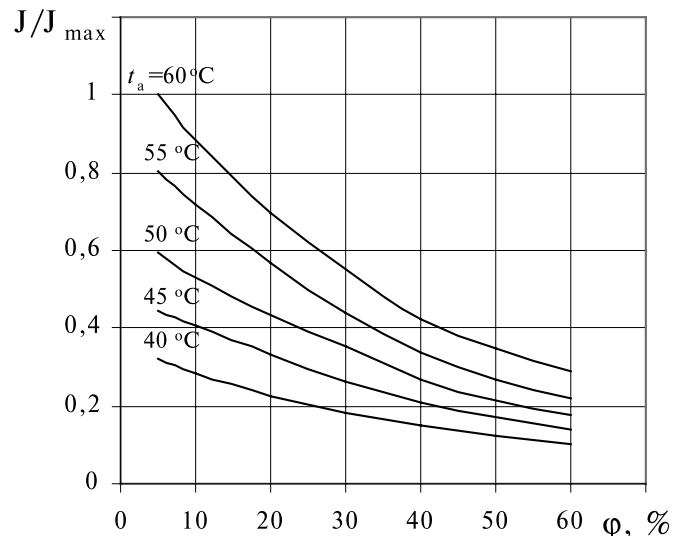


Рис. 1. Вплив параметрів теплоносія на інтенсивність сушки.

товщі матеріалу, оскільки нерівномірна вологість внутрішніх шарів призводить до руйнування природної структури, жолоблення та втрати зовнішнього вигляду. Факторами, якими найбільш доцільно впливати на технологічний процес зневоднення в таких випадках, є швидкість руху сушильного агента та його вологовміст, тобто в процесі зневоднення на різних етапах процесу доцільно підтримувати різні індивідуальні для кожного матеріалу параметри сушильного агента.

Основним недоліком традиційних теплонасосних сушарок для зневоднення рослинної сировини є те, що в процесі сушіння тепловологісні характеристики матеріалу змінюються, в той час, коли температура охолодження сушильного агента і, відповідно, ступінь його зневоднення підтримуються незмінними. При такому режимі сушіння не забезпечується оптимальна швидкість процесу та мінімальні енерговитрати впродовж усього періоду сушіння, тому що спочатку, коли матеріал має найбільшу вологість і з нього легко вилучається вільна волога, не потрібно підтримувати високий ступінь осушення агента. В кінці ж процесу, коли в матеріалі залишається лише зв'язана волога, необхідно проводити більш глибоке осушення агента, оскільки при невеликому ступені зневоднення агента тривалість останнього періоду сушіння значно збільшується. Це призводить до зайвих енерговитрат.

Для визначення оптимальних температурних режимів роботи теплового насоса, що забезпечу-

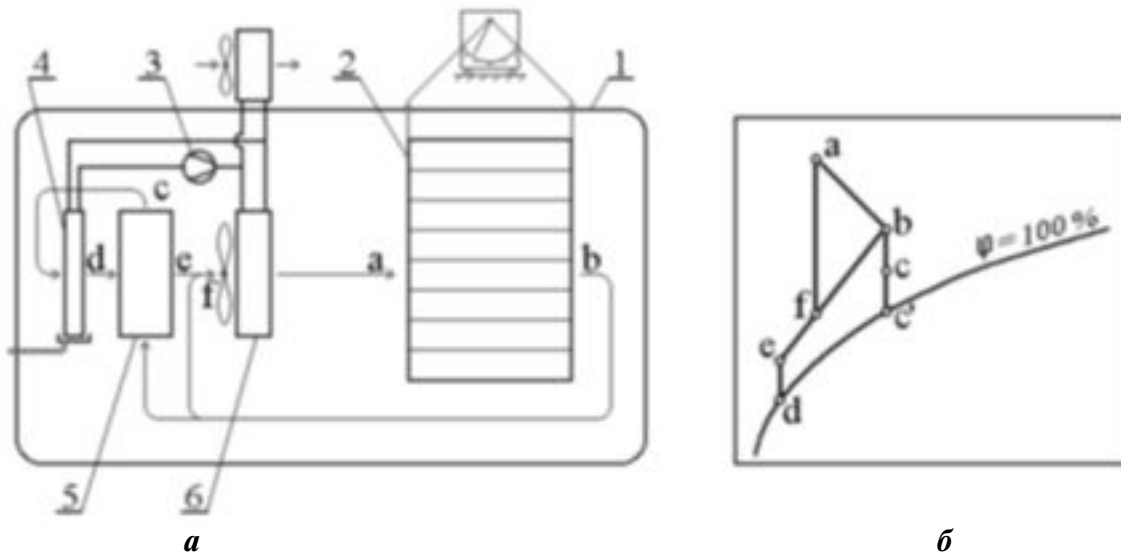


Рис. 2. Конденсаційна теплонасосна конвективна сушильна установка (а) і процес сушіння в I-d діаграмі (б): 1 – сушильна камера; 2 – візок; 3 – холодильний компресор; 4 – випарник; 5 – рекуперативний теплообмінник; 6 – двосекційний повітряний конденсатор; a-b – насичення вологою; b-c – попереднє охолодження в рекуператорі; c-c'-d – охолодження у випарнику; d-e – нагрівання в рекуператорі; e-f і b-f – змішування; f-a – нагрівання в конденсаторі.

ють мінімальні енерговитрати протягом усього періоду сушіння, необхідно мати ізотерми десорбції матеріалу, що висушується. На основі ізотерм десорбції може бути визначений необхідний масообмінний напір та задані тепловологісні параметри сушильного агента [4].

Пошук оптимальних параметрів технологічного процесу для деяких матеріалів було проведено на експериментальному теплонасосному сушильному стенді (рис. 2). Основними критеріями при визначенні оптимальних параметрів були якість кінцевого продукту, тривалість процесу і його питоме енергоспоживання. В результаті численних експериментів із зневоднення рослинної сировини було встановлено:

- тепловологісна обробка сушильного агента з метою зниження його вологовмісту збільшує рушійну силу процесу тепломасопереносу, що дає змогу реалізувати низькотемпературний процес зневоднення в конвекційних сушарках при температурах теплоносія, що не перевищують 35...60 °C;
- зниження вологовмісту сушильного агента з 15 г/кг до 5 г/кг при сталій температурі процесу дозволяє інтенсифікувати процес зневоднення на 25...35 %;
- низькотемпературний рівень процесу зневоднення в діапазоні 35...60 °C забезпечує надійну

роботу парокompресійного теплонасосного обладнання, а утилізація прихованої теплоти конденсації вилученої вологи дозволяє знизити зовнішні енерговитрати до 0,4...0,7 кВт-год/кг;

- замкнутий контур циркуляції сушильного агента та відвід вилучених продуктів зневоднення у скрапленому вигляді поширюють галузь застосування конвекційних сушарок на переробку екологічно небезпечних матеріалів та ефіромасляної сировини;

- енерговитрати на вилучення вологи в значній мірі залежать від тепловологісного стану теплоносія, існує оптимальний режим сушіння, який забезпечує максимальну ефективність роботи парокompресійного теплового насосу;

- теплонасосний цикл найбільш ефективний для видалення 70...80 % початкової вологи, видалення залишкової зв'язаної вологи вимагає набагато більших енерговитрат і викликає зниження загальної ефективності у розрахунку на повний період сушіння;

- аналіз кривих сушіння різних матеріалів (соєво-морквяний концентрат, яблука, гарбузи, буряк, гриби та ін.) показує, що для мінімізації енерговитрат на сушіння для кожного продукту необхідно проводити індивідуальний підбір ре-

Таблиця. Оптимальні параметри процесу низькотемпературного зневоднення рослинної сировини

№№ п/п	Найменування етапу технологічного процесу	Швидкість руху теплоносія, м/с	Температу ра, °С	Вологість сушильного агента, %	Тривалість етапу, год
1	Стартовий прогрів матеріалу	1...2	45...55	max до 100	1...1,5
2	Інтенсивне вилучення вільної вологи	1...2	40...50	60	3...6
3	Режим зневоднення з поступовим зниженням вологовмісту сушильного агента	1	40...50	60...20	2...3
4	Досушка матеріалу до кінцевої вологості $\varphi = 6\%$	1	40...50	15...10	2...3
5	Витримка зневодненого матеріалу при обдуві зневодненим повітрям	1	50 → 20	10	0,5

жимів роботи теплонасосного обладнання з урахуванням початкової вологості, частки вільної теплоти десорбції зв'язаної вологи.

Отримані матеріали дозволили внести корективи в технологічний процес низькотемпературного зневоднення і розбити його на п'ять етапів:

1. Стартовий прогрів матеріалу сушильним агентом до досягнення максимально допустимої температури.

2. Інтенсивне вилучення вільної вологи з матеріалу з використанням теплонасосного агрегату при максимально допустимих температурах і вологості сушильного агента.

3. Режим зневоднення матеріалу при поступовому, керованому зниженні вологовмісту сушильного агента.

4. Досушка матеріалу при мінімально досяжному вологовмісті сушильного агента.

5. Витримка зневодненого матеріалу при його обдуві повітрям з заданим вологовмістом і температурою.

Для кожного з п'яти станів експериментально визначено оптимальні швидкість руху теплоносія, температура та вологовміст сушильного агента, а також тривалість сушіння.

Для більшості зразків продукції, що зневоднюється (буряк, морква, яблука, соєво-морквя-

ний концентрат, лікарські рослини), діапазон оптимальних параметрів процесу зневоднення наведено у таблиці.

На рис. 3 представлені криві сушіння шматочків яблук в режимі зі сталими температурою та швидкістю сушильного агента і регульованим вологовмістом ($t = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v = 1\text{ м/с}$) з запропонованим режимом зневоднення, етапи якого вказані в таблиці. При практично однаковій тривалості зневоднення якість кінцевого продукту за органолептичними показниками була значно вищою в теплонасосній сушарці в порівнянні з високотемпературною конвективною сушаркою з теплогенератором. Крім того, енерговитрати на процес зневоднення скоротилися на 15 %. Слід також відзначити, що тривалість зневоднення, (див. табл. характеризує конкретну сушарку з співвідношенням встановленої холодопродуктивності теплового насоса та стартового електронагрівача до початкової маси продукту 1 кВт на 25 кг маси.

За результатами науково-дослідних робіт в ІТТФ НАН України створено кілька зразків теплонасосних сушарок, які пройшли успішні випробування та підтвердили анонсовані техніко-економічні показники. На рис. 4 і 5 представлено теплонасосну сушильну шафу з продуктивністю 4 кг/год по вилученій волозі та зерносушарку для насінневого зерна.

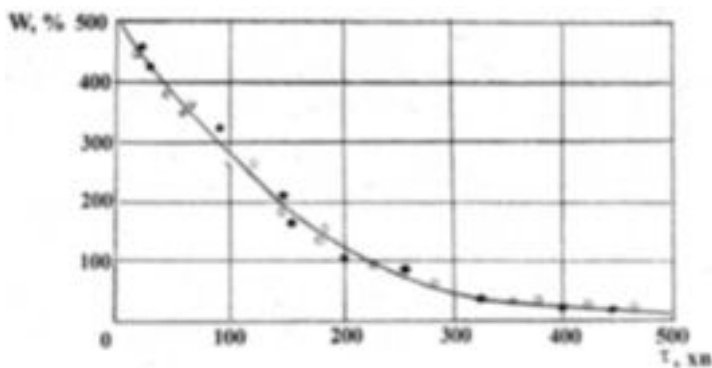


Рис. 3. Крива зневоднення яблук.



Рис. 4. Теплонасосна сушильна шафа з продуктивністю 4 кг/год по вилученій волозі.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів теплонасосного сушіння використані при створенні системи осушення повітря в конвективній сушильній установці, розрахованій на експлуатацію в кліматичних умовах півдня В'єтнаму, де середньорічна температура повітря становить 32 °С при вологості 95 %. Установка призначена для сушіння 450 кг за годину тропічних фруктів до вологості 6 % з метою одержання з висушеного матеріалу харчових порошоків. Сушарка тунельного типу має чотири робочі зони, в кожній зоні підтримуються свої тепловологісні параметри сушильного аген-



Рис. 5. Зерносушарка для насіннєвого зерна.

та. Перші три зони працюють за традиційною схемою з викидом вологого повітря та підживленням свіжого з атмосфери. Четверта зона має замкнутий контур циркуляції з теплонасосною системою осушування повітря. В зоні підтримується температура близько 60 °С і вологовміст сушильного агента 20 г/кг сухого повітря, що на 10 г/кг нижче, ніж в навколишньому середовищі.

ЛІТЕРАТУРА

1. T. Kudra, Arun S. Mujumdar. Advanced Drying Technologies. – 2001. – 472 p.
2. Alves-Filho, O., Strommen, I. The Application of Heat Pump in Drying of Biomaterials. – Drying Technology. – 1996. – 14 (9) – pp. 2061–2090.
3. Чалаев Д.М., Дабижка Н.А., Шаврин В.С., Хавин А.А. Оптимизация режимов работы теплонасосной конденсационной сушильной установки // Труды 1-й Междунар. научн.-практ. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ”. – Т. 4. – М.: МГАУ, 2002. – С. 234–236.
4. Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Дабижка Н.А. Обезвоживание коллоидных капиллярно-пористых материалов в условиях высоковлажной окружающей среды // Труды V Минского международного форума по тепломассообмену. – Минск: ГНУ “ИТМО им. Лыкова” НАНБ, 2004. – 11 с.

Получено 16.03.2006 г.