УДК 664.8.047

ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ ЛІКАРСЬКИХ ТА ПРЯНО-АРОМАТИЧНИХ РОСЛИН

Снєжкін Ю.Ф., академік НАН України, Дабіжа Н.О., канд. техн. наук, Малащук Н.С., аспірант

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.1>

Досліджено вплив температури, швидкості та вологовмісту сушильного агента на кінетику зневоднення трави м'яти перцевої. Виявлена суттєва залежність тривалості процесу сушіння від тепловологісних параметрів атмосферного повітря. Для створення контрольованих тепловологісних умов сушіння запропоновано зневоднювати пряно-ароматичні рослини в сушарках з замкненим циркуляційним контуром з застосуванням теплового насоса.

Исследовано влияние температуры, скорости и влагосодержания сушильного агента на кинетику обезвоживания травы мяты перечной. Обнаружена существенная зависимость продолжительности процесса сушки от параметров атмосферного воздуха. Для создания контролируемых тепловлажностных условий сушки предложено обезвоживать пряно-ароматические растения в сушилках с замкнутым циркуляционным контуром с применением теплового насоса.

The effect of temperature, speed and moisture content of the drying agent on the kinetics of dehydration of peppermint herb has been studied. A significant dependence of the duration of the drying process on the heat and humidity parameters of atmospheric air was revealed. To create controlled thermal-moisture drying conditions, it is proposed to dehydrate spicy-aromatic plants in dryers with a closed circulation circuit using a heat pump.

Бібл. 15, рис. 6.

Ключові слова: теплообмін, плівкове кипіння рідини, пористе середовище. d – вологовміст сушильного агента, г/кг с.п.; H – ентальпія, кДж/моль; p – тиск, мм рт.ст.; p/p_s – відносний тиск; q – питомі витрати теплоти, кДж/кг; t – температура, °С; v – швидкість, м/с; W – вологовміст матеріалу, %; τ – час, хв.; COP – коефіцієнт перетворення теплового насоса.**Індекси:** $км$ – компресор; n – поверхня; $s.a.$ – сушильний агент; s – насичення.

Вступ

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 його виробництва зростають щорічно на 20...30 % [1]. 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, бакте-

рицидними властивостями, що актуально в сучасному світі для захисної, антимутагенної, імуномодельючої дії на організм людини. Таким чином, в умовах сучасності лікарське рослинництво відіграє важливу роль у світовій економіці та фактично стало окремим напрямком підприємницької діяльності. Україна є потужним виробником лікарської рослинної сировини. В Україні лікарської сировини заготовляють близько 200 тис. тон за рік [2].

Свіжозібрана лікарська та пряно-ароматична сировина містить 85...90 % води, через високий вміст вологи відбувається ріст мікроорганізмів та біохімічні реакції, які призводять до погіршення якості, тому безпечне зберігання свіжих рослин протягом тривалого часу неможливе. Важливим етапом в процесі заготівлі лікарських та пряно-ароматичних рослин є сушіння, яке запобігає псуванню сировини та збільшує термін зберігання продукту. Проте під час сушіння при

підвищених температурах термочутливі компоненти рослин не зберігаються, що призводить до змінювання аромату, смаку та кольору [3].

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) [4]. При високій температурі сушіння трихоми можуть розриватися і через це – втрачати леткі сполуки через їх випаровування. Тому збереження цілісності трихоми або мінімізація її пошкодження під час сушіння сприяє утриманню ефірних олій в сушених травах.

Леткі ароматичні сполуки є найбільш чутливими компонентами в процесі сушіння, 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. 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 [5] показали, що втрати ефірної олії пропорційні температурі сушіння (16%, 23% та 65% при 30, 45 та 60 °C, відповідно), а виражені зміни складу основних компонентів ефірної олії відбуваються при 60 °C. В дослідженні [6] показано 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 °C до 0,14 % при 60 °C і 0,12 % при 80 °C. 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]. Добре корелюють з вище наведеними даними отримані в ІТТФ НАНУ результати дослідження впливу температури зневоднення на число аромату м'яти і чабера [7]. Виявлено, що підвищення температури теплоносія з 40 до 60 °C призводить до втрати аромату сушеної м'яти на 20 %, а чабера – на 29%. Подальше підвищення температури сушіння на 20 °C призводить до ще більших втрат – 42% і 61%, відповідно. В статі [8] 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 °C і його швидкості 1 і 2 м/с. Найвищий вміст ефірної олії (1,33 % об./мас.) спостерігався при температурі 40 °C і швидкості 1 м/с. Збільшення температури і швидкості теплоносія призводило до значних втрат ефірних олій.

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 °C. Також рекомендується сушити пряно-ароматичні рослини в товстому шарі. Бажано, щоб процес сушіння був дещо тривалішим, 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.

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 [9]. Під час низькотемпературного сушіння умови протікання процесу зневоднення суттєво залежать від тепловолігісних параметрів зовнішнього повітря, що в нестабільних кліматичних умовах України не дозволяє дотримуватися заданих режимів, і, як наслідок, не вдається досягати необхідних якісних показників продукту. Таким чином, дослідження, спрямовані на зниження енерговитрат та створення контрольованих умов сушіння лікарських та пряно-ароматичних рослин, є актуальними.

Мета роботи. Дослідження процесів зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин з метою визначення енергоефективних режимів сушіння, які забезпечують максимальне збереження біологічно активних речовин і ефірних олій.

Матеріали та методи досліджень

Як матеріал для досліджень була вибрана м'ята перцева (*Mentha piperita* L.) через її корисні властивості та широкий спектр застосування.

Хімічний склад сировини. Листки містять ефірну олію, в залежності від сорту її вміст складає від 1,5 до 2,7, інколи до 3,5 %. Головною складовою частиною олії є ментол (50...80 %), кетони ментону (10...30 %), піперитон, жасмон, пулегон та інші терпени, а та-

кож ефіри ментолу з оцтовою та ізовалеріановою кислотами. Інші групи БАР – флавоноїди (геспередин, антоціанідини), дубильні речовини (6...12 %), тритерпеноїди (урсолова та олеанолова кислоти), бетаїн, каротиноїди [10].

Заготівлю листя м'яти перцевої проводять під час цвітіння рослини в червні-липні. Підготовлені стебла збирають у пучки і підвішують під навісом або розкладають на рівній поверхні тонким шаром на папері чи тканині. Щоб сировина просушувалася рівномірно, стебла можна подрібнити на шматки по 7...10 см. Традиційно м'яту сушать в провітрюваному приміщенні, уникаючи сонячних променів. Стебла відокремлюють від листя в уже висушеному вигляді. Зберігають м'яту перцеву в герметичній тарі.

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

Для визначення рівноважної вологості трави м'яти перцевої залежно від відносної вологості повітря застосовувався тензометричний (статичний) метод Ван Бамелена. Суть методу полягає в тому, що зразки матеріалу з наперед визначеним вологовмістом витримують в ексикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти або різних солей. Відомій концентрації розчинів відповідає при даній температурі певний парціальний тиск пари, тобто відповідне значення відносного тиску p/p_s . Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г до досягнення постійної маси, при якій вологість їх відповідає рівноважній.

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 монографії [11]. Стебла м'яти з листками різали на шматки довжиною 10...12 см і викладали їх на піддон шаром 2...2,5 см. Дослідження проводилися в межах змінювання режимних параметрів процесу: температури сушильного агента – від 30 до 50 °C; швидкості сушильного агента – 1...2 м/с; вологовмісту сушильного агента – 6...14 г/кг с.п.; початкового питомого навантаження матеріалу – 1,7 кг/м².

Результати досліджень

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 і тиску. Під час сушіння для досягнення бажаного результату температура і вологість сушильного агента повинні відповідати заданому кінцевому вологовмісту матеріалу. Саме за ізотермами адсорбції встановлюється зв'язок між тепловолігнісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу в процесі сушіння [12].

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма адсорбції пари води м'ятою при температурі 30 °C, яка має форму, характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів (рис. 1). Використовуючи метод характеристичних кривих, заснований на потенційній теорії сорбції, за цією ізотермою визначені значення рівноважних вологовмістів для 40 та 50 °C. Слід зазначити, що ізотерми відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної вологи), коли тиск пари води над поверхнею матеріалу відрізняється від тиску насичення і залежить від його вологості й температури (рис. 2). В цій області можна виділити 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 вода міцно зв'язана і не може бути розчинником, тобто не може бути доступною для біохімічних реакцій; у інтервалі p/p_s від 0,2 до 0,7 вода адсорбційно зв'язана і доступна для реакцій неферментативного потемніння; 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 вологовмісті 10 % унеможливаються будь-які біохімічні реакції.

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 межі розділення фаз встановлюється рівновага. Умови локальної рівноваги знаходяться 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. 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.

Критерієм вибору раціональних режимів зневоднення пряно-ароматичної сировини є збереження при-

родного 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 дослідження процесу сушіння м'яти перцевої проводилися при тем-

пературах теплоносія 30, 40 і 50 °С та при незмінних швидкості теплоносія $v = 2$ м/с і вологовмістові повітря $d = 6$ г/кг с.п. Як видно з кривих сушіння м'яти (рис. 3), 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

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

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

Рис. 3. Вплив температури сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти. 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 ...2,5 см

приводить до зменшення тривалості сушіння з 900 до 600 хв. (у 1,5 рази). Швидкість сушіння м'яти в початковий момент при температурі сушильного агента 50°C становить $10,17\%/хв$, що в 4,3 рази вище, ніж при 30°C . Як видно з рис. 4, при збільшенні швидкості сушильного агента відбувається інтенсифікація процесу сушіння м'яти. Збільшення швидкості повітряного потоку з 1 до 2 м/с за інших рівних умов ($t = 50^{\circ}\text{C}$, $d = 6\text{ г/кг с.п.}$) приводить до скорочення часу сушіння до вологовмісту матеріалу 10% з 800 до 600 хв. (тобто на 25 %) і збільшує швидкість сушіння в початковий період в 1,9 рази.

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 вологовміст повітря коливається в діапазоні від 8 до 20 г/кг с.п. Експериментально встановлено, що під час сушіння м'яти при температурі сушильного агента 40°C (рис. 5) підвищення вологовмісту сушильного агента з 6 до 13 г/кг с.п., приводить до збільшення

Рис. 4. Вплив швидкості сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти.
Режимні параметри: 1, 1' – $v = 2\text{ м/с}$; 2, 2' – $v = 1\text{ м/с}$; $t = 50^{\circ}\text{C}$; $d = 6\text{ г/кг с.п.}$,

Рис. 5. Вплив вологовмісту сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти.
Режимні параметри: 1, 1' – $d = 6\text{ г/кг с.п.}$; 2, 2' – 13 г/кг с.п. ; $t = 40^{\circ}\text{C}$, $v = 2\text{ м/с}$,
висота шару 2...2,5 см.

часу сушіння до кінцевого вологовмісту 10% на 25 %, при цьому швидкість сушіння зменшується в 1,3 рази. Зниження інтенсивності вологовидалення пов'язане зі зменшенням рушійної сили масообміну Δp , яка визначається різницею парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу p_p і в парогазовому потокові рс.а. (рис. 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 вологовмісту сушильного агента на 7 г/кг с.п. приводить до збільшення середнього масообмінного напору в гігроскопічній області на 20 %, а в області адсорбційно-з'язаної вологи – на 40 %.

Аналіз експериментальних даних показав, що сушіння м'яти перцевої – довготривалий процес, здійснення якого в конвективних сушарках є не вигідним, через їхню низьку ефективність, що пов'язана із значними втратами теплоти з відпрацьованим повітрям (до 30%). Традиційні методи інтенсифікації процесу сушіння шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента мають обмеження при зневодненні пряно-ароматичних рослин через термочутливість ефірних олій. Так підвищення температури сушіння з 40 до 50 °C зменшує вміст ефірних олій в висушеній м'яті на 25 %, а збільшення швидкості сушильного агента з 1 м/с до 2 м/с – на 15 % [4]. Тому для збереження цінних речовин оптимальні режими сушіння м'яти повинні реалізовуватись в процесі низькотемпературного зневоднення при температурі, що не перевищує 40 °C, і швидкості сушіння 1 м/с.

Для підвищення енергоефективності процесу зневоднення м'яти запропоновано використовувати

конденсаційний метод сушіння з застосуванням теплового насоса. Інтеграція теплового насоса в цикл конвективної сушарки 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 [13]. Волога, що вилучається з матеріалу, не виноситься сушильним агентом в оточуюче середовище, а конденсується на холодній поверхні випарника теплового насоса і вилучається в скрапленому вигляді. Таким чином з'являється можливість утилізувати теплоту конденсації і повернути її в процес сушіння на більш високому температурному рівні, що дозволяє знизити питомі витрати енергії [14]. Під час роботи сушарки за замкненим циклом не відбувається викиду сушильного агента в атмосферу, тобто відсутнє забруднення оточуючого середовища частинками матеріалу, водяною парою, а також «забруднення» теплотою низького потенціалу.

Схематично конвективна сушарка з теплонасосною системою підготовки теплоносія та процес сушіння в $H-d$ діаграмі показані на рис. 6.

Цикл сушіння за замкненим контуром здійснюється таким чином. Нагріте у внутрішньому конденсаторі 3 теплового насоса сухе повітря (точка а) надходить до сушильної камери 1, де, проходячи над шаром висушуваного матеріалу, адіабатично зволожується і охолоджується (процес $a-b$). Зволожене повітря (стан b) осушується у випарнику теплового насоса 5 за рахунок охолодження (процес $b-c-d$) до заданої температури точки роси (стан d), при цьому волога, що міститься

Рис. 6. Теплонасосна сушарка і процес сушіння в $H-d$ діаграмі:
 1 – сушильна камера; 2 – вентилятор; 3 – внутрішній конденсатор; 4 – дросель;
 5 – випарник; 6 – компресор; 7 – зовнішній конденсатор.
 СА – контур сушильного агента; ХА – контур холодоагента

в повітрі, конденсується і в рідкому стані виводиться до збірника конденсату. Далі холодне осушене повітря нагрівається в конденсаторі теплового насоса 3 (процес $d-a$) і повертається до сушильної камери 1.

Під час теплонасосного сушіння в замкненому контурі можливо реалізувати складний алгоритм управління процесом зневоднення пряно-ароматичної сировини. 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 теплопідводу, так і ступінь осушування сушильного агента.

Слід зазначити, що в процесі теплонасосного сушіння в конденсаторі теплового насоса виділяється теплоти більше ніж необхідно для зневоднення матеріалу. Тому частина теплоти конденсації відводиться за межі сушильної камери за допомогою зовнішнього конденсатора 7 (рис. 6), який працює послідовно з внутрішнім конденсатором 3. 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 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.

Показником, що характеризує ефективність сушильної установки, є витрата енергії на видалення 1 кг вологи з матеріалу. Питомі витрати теплоти на процес зневоднення з однократним використанням теплоносія для ідеальної ($H_a = H_b$) конвективної сушарки (процес $m-a-b$ в $H-d$ діаграмі, рис. 6) визначаються за рівнянням

$$q = \frac{H_a - H_m}{d_b - d_a}.$$

Для теплонасосної конденсаційної сушарки (процес $a-b-c-d$ в $H-d$ діаграмі, рис. 6) споживана потужність компресора теплового насоса складає [15:]

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

де $COP = 0,45 \cdot \left(\frac{t_a + 273}{t_a - t_d} \right)$ – усереднена величи-

на коефіцієнта перетворення для дійсного циклу парокомпресійних теплових насосів, яка складає 0,45...0,50 циклу Карно.

Для розрахунку енергетичних показників задаються параметрами теплоносія в ключових точках процесу: t_m – температура атмосферного повітря; t_a – температура теплоносія на вході до сушильної камери; d_a – вологовміст повітря на вході до сушильної камери; H_a – ентальпія теплоносія на вході до сушильної камери; t_b – температура теплоносія на виході з сушильної камери; d_b – вологовміст теплоносія на виході з сушильної камери; t_d – температура охолодження теплоносія в випарнику теплового насоса; H_d – ентальпія осушеного теплоносія.

Порівняння питомих енерговитрат в конвективній і теплонасосній сушарках для режимів зневоднення з однаковими тепловологісними параметрами процесу ($t_m = 30^\circ\text{C}$; $d_a = 20$ г/кг с.п.; $t_a = 40^\circ\text{C}$; $t_b = 35^\circ\text{C}$; $t_d = 23^\circ\text{C}$) показало, що питомі енерговитрати при теплонасосному сушінні (2000 кДж/кг) в 2,7 рази менші ніж при конвективному (5500 кДж/кг). Для заданих параметрів сушіння $COP = 4,25$.

Висновки

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.

Розроблені енергоефективні режими сушіння лікарських та пряно-ароматичних рослин з перемінними тепловологісними параметрами сушильного агента, при яких температура матеріалу не перевищує гранично допустиму для даного виду сировини, а втрати ефірних олій не перевищують 20 % від вихідної сировини.

Для створення контрольованих тепловологісних параметрів сушильного агента запропоновано зневоднювати пряно-ароматичні рослини в сушарках з

замкненим циркуляційним контуром з застосуванням парокомпресійного теплового насосу. В порівнянні з традиційними конвективними сушарками технологія сушіння з тепловим насосом забезпечує зниження питомих енерговитрат в 2...3 рази і є екологічно чистою.

ЛІТЕРАТУРА

1. *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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
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. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Шапарь Р.А. Энергосберегающая технология производства сушеной продукции из растительных материалов // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2008. – Вип. 34. – Том 2 – С. 84-87.
10. Ковальов В.М., Павлій О.І., Ісакова Т.І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. – Харків: «Прапор» НФАУ, 2000. – 704 с.
11. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. – Київ: "Сік Груп Україна", 2018. – 228 с. ISBN 978-617-7457-69-4.
12. Дабіжжа Н.А. Энергоэффективная технология сушки термолabileльных материалов с использованием тепловых насосов // *Наукові праці ОНАХТ*. – 2011. – Вип. 39. – Т. 2. – С.341-345.
13. 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.
14. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Дабіжжа Н.О. Аналіз енергетичних показників процесу теплонасосного сушіння // *Промышленная теплотехника*. – 2017. – Т. 39, № 3. – С. 39-44.
15. Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Дабижжа Н.А., Гатилов К.А. Эффективность применения тепловых насосов в процессах конвективной сушки // *Наукові праці ОНАХТ*. – Вип.30. – Т.1. – С. 185-189.

ENERGY RESOURCE SAVING TECHNOLOGIES OF DEHYDRATION OF MEDICINAL AND AROMATIC PLANTS

Sniezhkin Yu.F., Dabizha N.O., Malashchuk N.S.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.1>

The world market development of plant products demonstrates growing demand for medicinal and aromatic raw materials that are widely used in pharmaceutical, perfume and cosmetic products, food production, etc. An important step in post harvesting storage of medicinal and aromatic plants is drying, which prevents spoilage of raw materials and increases the shelf life of the product. However, heat-sensitive plant components, such as biologically active compounds and essential oils are lost during drying at elevated temperatures. That leads to changes in the aroma, taste and color of dried herbs.

The purpose of the article is studies of dehydration processes of medicinal and aromatic plants to determine energy-efficient drying modes that ensure maximum preservation of biologically active compounds and essential oils.

The temperature of the drying agent plays the most important role in preserving of heat-sensitive components in dried herbs. The analysis of experimental data of temperature effect on content of essential oils showed that drying temperature of aromatic plants should not exceed the maximum allowable temperature of 35-40 °C. The effect of temperature, speed and moisture content of the drying agent on the kinetics of dehydration of peppermint herb has been studied. The experiments were carried out at the drying agent temperature in the range of 30-50 °C, its velocity – 1-2 m/s, moisture content of drying air – 6-14 g/kg d.a.

Significant dependence of drying process duration on heat-humidity parameters of atmospheric air was revealed. To create controlled drying conditions, it is proposed to dehydrate aromatic plants in dryers with a closed circulation circuit using a heat pump.

Energy-efficient drying modes for medicinal and aromatic plants with a variable degree dehumidification of drying agent have been developed, in which the temperature of the material does not exceed the maximum allowable, and aroma losses do not exceed 20-25% of the raw material. The use of a heat pump allows to reduce the specific energy consumption for drying in 2...3 times.

References 15, figures 6.

Key words: aromatic raw materials, drying, adsorption, heat pump, energy efficiency, specific energy consumption.

1. *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.

2. *Pavliuk R.Yu, Poharskaia V.V., Yanytskyi V.V.* [Commodity science and innovative technologies of processing of medicinal and technical vegetable raw materials.], [Kharkiv: KhSUFT], 2013. 429 p. (in Rus.)

3. *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.

4. *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.

5. *Nayak P., Kumar T., Gupta A.K., Joshi N.U.* Peppermint a medicinal herb and treasure of health // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*.— 2020. P.1519-1528.

6. *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.

7. *Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Iliencko O.O., Loveiko V.O.* [Drying of mint on convective dryers]. [Food industry], 2010. V. 9. P. 168-17. (in Ukr.)

8. *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.

9. *Shapar R.A.* [Energy-saving technology for the production of dried products from plant materials]. [Scientific Proceedings of ONAFT]. 2008. S.34. V. 2. P. 84-87. (in Rus.)

10. *Kovalov V.M., Pavlii O.I., Isakova T.I.* [Pharmacognosy with the basics of plant biochemistry], [Kharkiv: «Prapor» NFAU], 2000, 704 p. (in Ukr.)

11. *Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.* [Heat-mass exchange technologies for pectin-containing raw materials processing], [Sik Hrup Ukraine], 2018. 228 p. ISBN 978–617–7457–69–4 (in Ukr.)

12. *Dabizha N.O.* Energy-efficient drying technology of thermolabile materials with using heat pumps]. [Scientific Proceedings of ONAFT], 2011. S. 39. V. 2. P. 341-345. (in Rus.)

13. *Sniezhkin Yu.F., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Shapar R.O., Khavin O.O., Dabizha N.O.* [Heat pump application in drying]. [Industrial heat engineering], 2006. V. 28. № 2. P.106–110. (in Ukr.)

14. *Snezhkin Yu.F., Chalaev D.M., Dabizha N.O.* [Analysis of energy performance of heat pump drying]. [Industrial heat engineering], 2017. V. 39. № 3. С. 39–44. (in Ukr.)

15. *Snezhkin Yu.F., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Dabizha N.O., Gatilov K.O.* [Efficiency of using heat pumps in convective drying processes]. [Scientific Proceedings of ONAFT], 2007. S. 30. V.1. P. 185–189. (in Rus.)

Отримано 21.10.2021

Received 21.10.2021