

УДК 664.8.047

## СОРБЦІЙНІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРЯНО-АРОМАТИЧНИХ РОСЛИН ЯК ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ

Снежкін Ю.Ф.<sup>1</sup>, академік НАН України, Дабіжа Н.О.<sup>2</sup>, канд. техн. наук.,  
Дмитренко Н.В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук., Малащук Н.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, професор, [Isnezhkin@gmail.com](mailto:Isnezhkin@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, [dabizha.nataliia@gmail.com](mailto:dabizha.nataliia@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0001-6124-1981>

<sup>3</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, [natatal@ukr.net](mailto:natatal@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-4520-4205>

<sup>4</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник, [malashchuk\\_n@ukr.net](mailto:malashchuk_n@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-8648-1006>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.1>

*В статті наведено результати досліджень сорбційних властивостей м'яти перцевої. Визначені величини чистої ізостеричної теплоти адсорбції за ізотермами пари води. Експериментально одержані питомі витрати теплоти на сушіння м'яти перцевої. Встановлено параметри процесів сушіння і зберігання м'яти перцевої, при яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій.*

*The article presents the results of study on sorption properties of peppermint leaves. The net isosteric heat of adsorption was calculated from moisture isotherms. The specific heat consumption for drying peppermint was obtained experimentally. The parameters of peppermint drying and storage, which ensure minimum specific energy consumption and maximum preservation of essential oils, were determined.*

Бібл. 17, рис. 4.

**Ключові слова:** пряно-ароматичні трави, м'ята перцева, сушіння, адсорбція, теплота випаровування води.

$H$  – ентальпія, кДж/моль;

$d$  – вологовміст повітря, г/кг с.п.;

$p$  – тиск, мм рт.ст.;

$p/p_s$  – відносний тиск;

$q$  – питома теплота випаровування, кДж/кг;

$R$  – газова стала (8,314 Дж моль<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>);

$r$  – питома теплота паротворення, кДж/кг;

$T$  – температура, К;

$t$  – температура, °С;

$W$  – вологовміст матеріалу, %;

$w$  – вологість матеріалу, %;

$\varphi$  – відносна вологість повітря.

Індекси:

$a$  – адсорбційний;

$st$  – ізостеричний;

$s$  – насичення.

### Вступ

Пряно-ароматичні трави широко використовуються у виробництві лікарських препаратів, ароматизаторів, фарбників, тощо. Високий попит на пряно-ароматичні трави в біотехнологічній, косметичній, фармацевтичній та харчовій промисловостях зумовив підвищені вимоги до технологічних процесів переробки пряно-ароматичної сировини для збереження біологічно активних речовин і ефірних олій. Сировинною базою для цих виробництв є культивовані рослини, наприклад, м'ята перцева. Слід зазначити, що світове виробництво м'яти перцевої становило в середньому 105 038 т у 2015-2018 рр., в тому числі у Східній Європі – 176 т [1].

В Україні офіційно використовують лише культивовану сировину м'яти перцевої, що широко розповсюджена по всій території.

М'ята перцева (*Mentha piperita* L.) є відомою лікарською ефірноолійною культурою, яку широко застосовують завдяки корисним властивостям і терапевтичній дії на організм людини. М'ята перцева є джерелом одержання аптечного листа та ефірної олії, а також її компонентів, зокрема ментолу, що використовуються у хіміко-фармацевтичній, парфумерно-косметичній, кондитерській, харчовій, лікєро-горілчаній, тютюновій промисловостях та медицині [2]. Основним активним компонентом м'яти перцевої є ефірна олія,

концентрація якої в листках м'яти коливається від 1,2 до 4,8 %, а в суцвіттях досягає 6 % [3]. В стеблах ефірна олія майже відсутня. До складу ефірної олії м'яти перцевої входять ментол (30–55 %), ментон (14–32 %), ізоментон (2–10 %), 1,8–цинеол (6–14 %),  $\alpha$ -пінен (1,0–1,5 %),  $\beta$ -пінен (1–2 %), лімонен (1–5 %), неоментол (2,5–3,5 %), ментофуран (1–9 %), ментил ацетат (2,8–10,0 %), пулегон (максимум 4,0 %), карвон (до 1,0 %), ізопулегол (до 0,2 %) [4]. Інші групи біологічно активних речовин м'яти перцевої – флавоноїди (гесперидин, антоціанідини), дубильні речовини (6...12 %), тритерпеноїди (урсолова та олеанолова кислоти), бетаїн, каротиноїди [3]. Також м'ята є багатим джерелом мінералів, таких як Na, Mg, K, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Zn і Se [2]. Листя м'яти здебільшого споживають у свіжому або сушеному вигляді як ароматизатор в різних видах харчових продуктів, в чайних напоях. В медицині м'ята перцева визнана у світі в першу чергу своїми антимікробними та антиоксидантними властивостями, також широко відомі такі її лікувальні властивості як противірусні, антибактеріальні, проти-запальні, протигрибкові, протиастматичні, алопатичні, спазмолітичні, антисептичні тощо. Завдяки комплексу біологічно активних речовин м'ята перцева входить до складу багатьох фармацевтичних препаратів, для виготовлення яких використовують траву, листя та ефірну олію. Так, в Україні сировина м'яти перцевої у ролі інгредієнта чи основного компонента входить до складу 63 лікарських засобів [5].

М'ята швидкопсувна сезонна рослина, щоб зробити м'яту доступною для використання протягом усього року її необхідно зберегти. Єдиним шляхом збереження пряно-ароматичних рослин є сушіння, під час якого зменшення вологовмісту матеріалу дозволяє досягти на поверхні рослини такого рівня активності води, при якому унеможливаються мікробне псування та будь-які біохімічні реакції, що сприяє подовженню термінів зберігання. Крім того зменшуються витрати на пакування та транспортування висушеної трави.

Сушіння пряно-ароматичних трав здійснюється природним повітряно-тіньовим способом або нагрітим повітрям в сушильних установках. При природному сушінні процес зневоднення суттєво залежить від тепловологісних параметрів атмосферного повітря, які в нестабільних кліматичних умовах України змінюються в широкому діапазоні, що не дозволяє проводити зневоднення в сталих оптимальних умовах і призводить до неможливості одержати кінцевий продукт з необхідними якісними показниками. Сушіння нагрітим повітрям має ряд переваг: у сушарках можливо регулювати темпе-

ратурний режим процесу, швидкість та вологовміст сушильного агента. Організація контрольованого процесу сушіння дозволяє реалізувати оптимальні з точки зору збереження біологічно активних речовин пряно-ароматичної сировини режими. В зв'язку з цим значний інтерес становлять дослідження, що спрямовані на визначення гранично допустимої температури нагріву матеріалу, його рівноважної вологості в залежності від параметрів сушильного агента при різних режимах сушіння та питомих витрат енергії під час зневоднення пряно-ароматичної сировини.

#### Аналіз досліджень і публікацій

При дослідженні пряно-ароматичних рослин як об'єктів сушіння важливе значення має визначення гранично допустимої температури нагріву матеріалу, при якій не відбуваються фізико-хімічні, біохімічні та структурні зміни. Для пряно-ароматичної сировини найбільш термочутливими компонентами в процесі сушіння є леткі ароматичні сполуки ефірних олій, 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 [6]. Найважливішу роль у збереженні летких сполук сушених трав під час зневоднення відіграє температура сушильного агента. Для визначення гранично допустимої температури нагріву м'яти проаналізовані експериментальні дані щодо впливу температури на вміст ароматичних речовин. В дослідженні [7] 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, також відбуваються виражені зміни складу її основних компонентів. Добре корелюють з вище наведеними даними отримані в ІТТФ НАНУ результати дослідження впливу температури зневоднення на число аромату м'яти перцевої [8]. Виявлено, що підвищення температури теплоносія з 40 до 60 °C призводить до втрати аромату сушеної м'яти на 20 %. Подальше підвищення температури сушіння на 20 °C призводить до ще більших втрат – 42%. В статі [9] 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, застосування зависокої температури сушіння призводить до втрати летких сполук, а також до зміни концентрації та складу ефірних олій, що різко погіршує аромат та смак висушеної трави. Для запобігання втрат летких речовин гранично допустима температура нагріву м'яти перцевої не повинна перевищувати 35...40 °С.

Сушіння рослинних матеріалів пов'язано з видаленням з них води, а швидкість зневоднення визначається як тепло- і вологообміном між поверхнею тіла та сушильним агентом, так і переносом усередині тіла, обумовленим формою зв'язку вологи з матеріалом [10]. Для аналізу форм зв'язку вологи використовують ізотерми адсорбції вологих матеріалів, що є функціональною залежністю між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу при сталій температурі і тиску. Для низькотемпературного процесу сушіння пряно-ароматичних трав можливо застосувати гіпотезу про локальну термодинамічну рівновагу, згідно з якою в кожен малий проміжок часу на межі розділу фаз встановлюється рівноважний стан. Умови локальної рівноваги з'ясовуються з ізотерм адсорбції, що дозволяє встановити зв'язок між тепловолігніми параметрами сушильного агента і висушеного матеріалу в процесі сушіння, а також визначити масообмінний напір  $\Delta p$  [11]. Також з ізотерм адсорбції визначають температуру і вологовміст сушильного агента, що відповідають залишковому вологовмісту матеріалу.

Користуючись ізотермами адсорбції, можна пов'язати класифікацію стану вологи в матеріалі з процесом її видалення під час сушіння [10], а також одержати дані щодо теплоти випаровування вологи різних форм і видів зв'язку з матеріалом, тобто мати можливість дати енергетичну характеристику зв'язаній волозі. Рослинні тканини утримують крім вологи з фізико-механічною формою зв'язку й адсорбційно-зв'язану вологу. Для видалення адсорбційно-зв'язаної вологи необхідно підвести до матеріалу більше енергії, чим при випаровуванні вільної води. Загальні витрати енергії на видалення вологи з рослинних тканин при сушінні визначаються як сума питомої теплоти випаровування вільної води  $r$  і чистої теплоти адсорбції  $q_a$ :  $q = r + q_a$  [12].

В теперішній час для визначення теплоти адсорбції харчових продуктів використовується два методи [13]:

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

Калориметричні вимірювання технічно складні через необхідність точного вимірювання невеликої кількості теплоти, що виділяється. З цієї причини, в літературних джерелах теплоти сорбції харчових продуктів, що розраховані за ізотермами адсорбції, представлені більш широко ніж виміряні калориметрично, хоч вони мають вищий ступінь точності.

Знання теплоти адсорбції має велике значення при проектуванні обладнання для зневоднення та при розробленні енергоефективних режимів сушіння пряно-ароматичних рослин. Це пов'язано з тим, що теплота випаровування сорбованої води може зростати до значень, що перевищують теплоту пароутворення чистої води, оскільки пряно-ароматичні рослини зневоднюються до низького залишкового вологовмісту (5-15 %), при якому вода в матеріалі знаходиться в зв'язаному стані. Також дані з сорбційної рівноваги використовуються в таких технологічних процесах як зберігання, змішування і пакування та для прогнозування стабільності сухих продуктів і визначення термінів їхньої придатності.

Таким чином, знання сорбційних властивостей пряно-ароматичних рослин та визначення теплоти випаровування під час їх зневоднення є актуальними при розробленні ряду технологічних процесів (сушіння, зберігання, пакування) та створенні сушильного обладнання.

**Мета роботи.** Дослідження сорбційних та термодинамічних властивостей пряно-ароматичних рослин для визначення технологічних параметрів процесів сушіння і зберігання, при яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій.

#### **Матеріали та методи досліджень**

Для досліджень свіжа трава м'яти перцевої була придбана у місцевого виробника в Україні. Початкове значення вологості листя у свіжому стані визначалося за ДСТУ 7804:2015 перед кожним експериментом і варіювалось в межах 75,6...88,1 %.

Для визначення рівноважної вологості листя 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 0,001 г до досягнення постійної маси, при якій вологість їх відповідає рівноважній.

Для визначення питомої теплоти випаровування води було застосовано створений в ІТТФ НАНУ диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01 [14]. Принцип його роботи заснований на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу через випаровування та кількості тепла, що витрачене на це випаровування.

Калориметричний комплекс на базі установки ДМКИ-01 (рис. 1) функціонально об'єднує тепловий блок з вмонтованою калориметричною платформою 3, аналітичні терези 10, блок електронного регулювання 14, систему продувки повітря пневмонасосом 12 та персональний комп'ютер зі спеціально розробленим програмним забезпеченням 15. Сигнали від перетворювачів температур, перетворювачів теплового потоку і аналітичних терезів через електронний блок поступають на персональний комп'ютер 15 зі спеціально розробленим програмним забезпеченням.

Для дослідів з листям м'яти було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм. В ній перетворювачі теплового потоку розміщені вздовж периметру стінок комірок. Цілий ли-

сток м'яти скручувався у м'який рулон та вміщувався у вимірювальну комірку. Ізотермічне кондуктивне сушіння відбувалось в калориметричній камері при температурах 40 та 50 °С до моменту досягнення матеріалом вологості, що рівноважна з повітрям всередині камери.

#### Результати досліджень

За результатами експериментальних досліджень з гігротермічної рівноваги одержана ізотерма адсорбції пари води листям м'яти при температурі 30 °С, яка має форму, характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів (рис. 2). Використовуючи метод характеристичних кривих, заснований на потенційній теорії сорбції, за цією ізотермою визначені значення рівноважних вологовмістів для 40 та 50 °С.

Ізотерми відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води), де 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 (волеговміст матеріалу нижче 10 %) вода міцно зв'язана і не доступна для біохімічних реакцій. У інтервалі  $p/p_s$  від 0,2 до 0,7 вода адсорбційно зв'язана і доступна для реакцій неферментативного

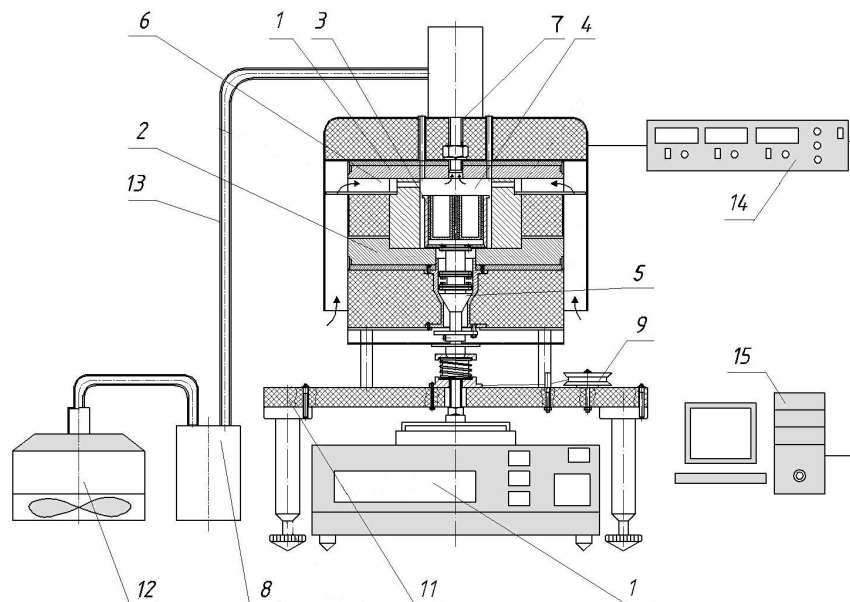


Рис. 1. Принципова схема установки ДМКИ-01.

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

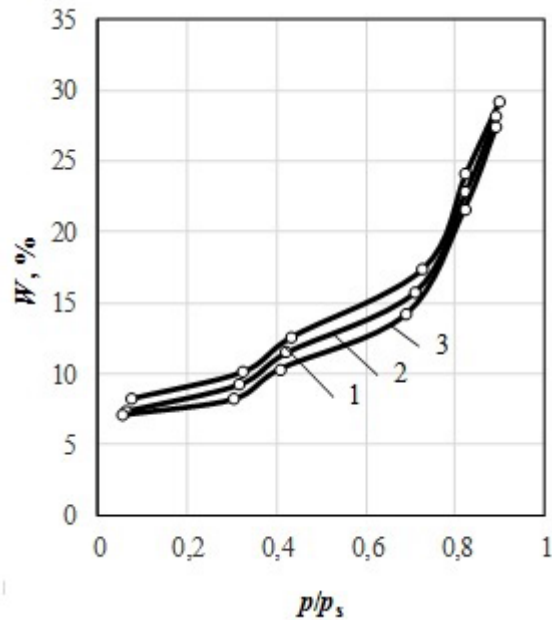


Рис. 2. Ізотерми адсорбції пари води м'ятою перцевою: 1 – 30 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50 °С

потемніння, в цьому інтервалі вологовміст матеріалу становить 10...16 %. У інтервалі  $p/p_s$  від 0,7 до 1 вода слабо зв'язана капілярними силами і доступна як для розвитку мікроорганізмів, так і для хімічних реакцій. За ізотермами адсорбції встановлюємо, що для запобігання мікробного псування вологовміст висушеної м'яти не повинен перевищувати 16 %, при вологовмісті меншому ніж 10 % унеможливаються будь-які біохімічні реакції.

За ізотермами адсорбції визначають тепловологісні параметри сушильного агента, при яких можливо провести досушування м'яти перцевої до заданого залишкового вологовмісту. В кліматичних умовах України влітку в період збирання та переробки м'яти перцевої вологовміст атмосферного повітря коливається в широкому діапазоні від 8 до 20 г/кг с.п. У разі традиційного конвективного сушіння такі коливання вологовмісту повітря, що надходить до сушарки, приводять до коливання вологості сушильного агента. Так, при температурі сушильного агента 40 °С його вологість буде змінюватись згідно  $H-d$  діаграмі вологого повітря в діапазоні від 18 до 42 %, таким умовам відповідає рівноважний вологовміст матеріалу в межах 8...12 %. При 50 °С вологість сушильного агента змінюється від 10 до 25 %, а рівноважний вологовміст – в межах 7...8 %. Аналіз гіротермічної рівноваги м'яти перцевої показав, що при температурі 40 °С і високій відносній вологості більше ніж 38 % сушильного агента не можливо досушити м'яту до заданого залишкового вологовмісту 10 %, тому що матеріал приходить до стану рівноваги

з сушильним агентом раніше, і процес зневоднення припиняється. Таким чином, на заключному етапі сушіння під час видалення адсорбційно-зв'язаної вологи вологовміст сушильного агента при температурі 40 °С не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

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

$$\left(\frac{\partial \ln p}{\partial \ln T}\right) = \frac{q_{st}}{RT^2}.$$

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

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

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

На рис. 3 наведена залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції, що розрахована для температури 40 °С, від вологовмісту матеріалу. Як видно, теплота адсорбції в області слабо зв'язаної води поступово зростає із зменшенням вологовмісту, в діапазоні від 24 до 20 % спостерігається зниження теплоти, що пов'язане з впливом на випаровування вологи летких речовин ефірної олії м'яти. Далі теплота адсорбції різко збільшується в області адсорбційно-зв'язаної вологи. Питомі теплота випаровування  $q$  слабо зв'язаної води незначно перевищує теплоту паротворення. Витрати ж енергії на випаровування адсорбційно-зв'язаної вологи збільшуються при досягненні матеріалом вологовмісту 12 % на 29 % в порівнянні з теплотою паротворення вільної води, тобто відношення  $q/r = 1,29$ .

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

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

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

Результати дослідження теплоти на випаровування в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої наведені на рис. 4 в координатах значень питомих витрат теплоти на сушіння, приведених до питомої теплоти випаровування чистої води при відповідній температурі ( $R = q_{\text{витрачене}} / r_{\text{води}}$ ).

Експериментально отримані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти при температурі 40 °С (рис. 4, крива 1) відповідають теплоті випаровування чистої води ( $R=1$ ) лише на початку процесу. Очевидно, тут відбувається природна втрата води листям крізь устячка, які призначені для транспірації. Але вологість 70 % відносних стає критичною для листя. Тому до процесу випаровування води приєднується процес випаровування летких ароматичних сполук з залоз-трихом на поверхні листя. Свідченням цього є спадання величини  $R$  нижче теплоти випаровування чистої води та поява сильного аромату м'яти у повітрі, яке видалається з калориметричної камери. Виділення летких ароматичних сполук з листя відбувається протягом всього подальшого процесу сушіння, монотонно, паралельно з видаленням вільної води.

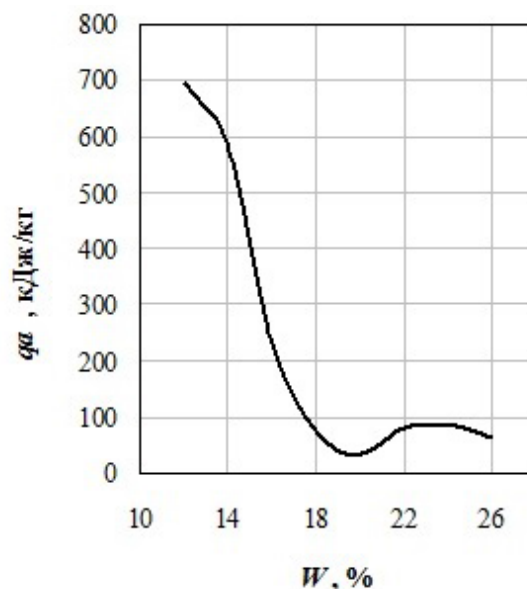
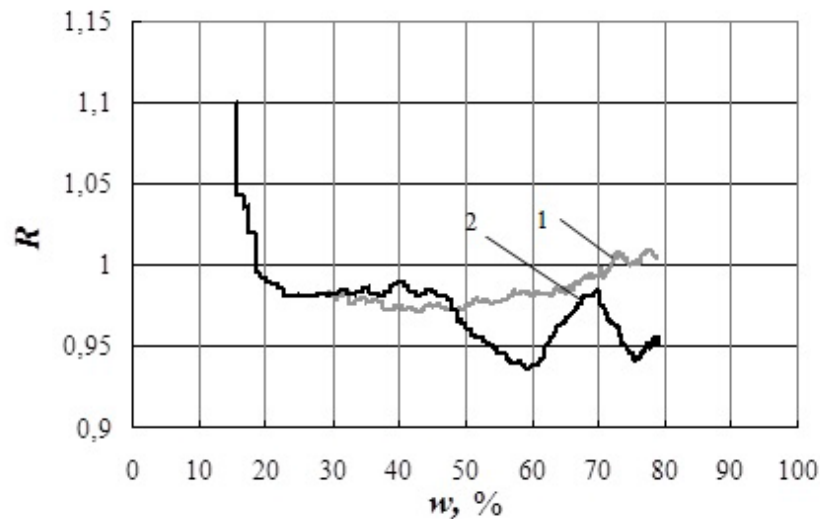


Рис. 3. Чиста ізостерична теплота адсорбції пари води м'ятою перцевою



**Рис. 4.** Залежність від відносної вологості приведених питомих витрат теплоти на висушування листя м'яги перцевої при температурі сушіння: 1 – 40 °C; 2 – 50 °C

Експериментально отримані значення питомих витрат теплоти на висушування листя м'яги при температурі 50 °C (рис. 1, крива 2) вказують на значне випаровування легких сполук з самого початку процесу. Також, на кривій витрат теплоти спостерігаємо ендотермічні піки, можливо, обумовлені плавленням ментолу, чи випаровуванням інших ароматичних речовин (ментону, жасмону, пулегону тощо). Періодичне повернення витрат теплоти до значення теплоти випаровування чистої води може свідчити про закінчення процесу плавлення, чи про вичерпання запасів відповідної легкої сполуки. Подальша (після досягнення вологості 45 % відн.) відповідність кривої витрат теплоти при 50 °C значенням кривої витрат теплоти при 40 °C свідчить про подальше випаровування ментолу, концентрація якого в ефірних оліях м'яги найбільша. Різке зростання витрат теплоти (вище теплоти випаровування вільної води) наприкінці процесу сушіння свідчить про початок видалення з листя адсорбційно-зв'язаної води: з міжклітинних капілярів, адсорбованої біополімерами мембран та води гідратних сфер розчинених речовин. Цей момент добре погоджується з зростанням чистої ізотеричної теплоти адсорбції в області адсорбційно-зв'язаної води (рис. 3).

#### Висновки.

Проведені дослідження сорбційних властивостей та теплоти випаровування дозволили встановити ряд технологічних параметрів процесів сушіння і зберігання м'яги перцевої, при яких забезпечується максимальне збереження ефірних олій:

1. Для зменшення втрат ефірної олії та для запобігання дії реакцій не ферментативного потемніння м'яги необхідно сушити до залишкового вологовмісту, що не перевищує 10 %.

2. За умов сорбційної рівноваги визначені тепловологісні параметри сушильного агента при досушуванні м'яги до залишкового вологовмісту 10 %. Під час видалення зв'язаної води вологовміст сушильного агента не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

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

4. Експериментально калориметричним методом одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яги при температурах 40 і 50 °C. Виявлено вплив легких речовин ефірної олії м'яги перцевої на теплоту випаровування.

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

## ЛІТЕРАТУРА

1. FAOSTAT. Режим доступу: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL>.
2. 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.
3. Ковальов В.М., Павлій О.І., Ісакова Т.І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. – Харків: «Прапор» НФАУ, 2000. – 704 с.
4. European Pharmacopoeia 8th Edition (Ph. Eur. 8), Council of Europe. – Strasbourg, 2014.
5. Мінарченко В.М., Бутко А.Ю. Дослідження вітчизняного ринку лікарських засобів рослинного походження // Фармацевтичний журнал. – 2017. – № 1 – С. 30-36.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 464 с.
11. Снежкін Ю.Ф., Дабіжжа Н.О., Малащук Н.С. Енергоресурсозберігаючі технології зневоднення лікарських та пряно-ароматичних рослин // Теплофізика та теплоенергетика. – 2021. – Т. 43, №4. – С. 7-16.
12. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. Academic Press, 1982. 306 p.
13. Al-muhtaseb A.H., McMinn W.A.M., Magee T.R.A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review // Trans IChemE. – 2002. – V. 80, Part C. – P. 118-128.
14. Дмитренко Н.В., Іванов С.О., Снежкін Ю.Ф., Декуша Л.В. Дослідження теплофізичних характеристик пагонів верби за допомогою установки синхронного теплового аналізу // Промышленная теплотехника.– 2015. – Т. 37, №2. – С. 77-84.
15. Chickos J.S., Garin D.L., Hitt M., Schilling G. Some solid state properties of enantiomers and their racemates // Tetrahedron. – 1981 – V. 37. – P. 2255-2259.
16. Hoskovec M., Grygarová D., Cvacka J., Streinz L., Zima J., Verevkin S., Koutek B. Determining the vapour pressures of plant volatiles from gas chromatographic retention data // Journal of Chromatography. – 2005. – V. 1083 (1-2). – P. 161-172.
17. Batiu I. Vapor-liquid equilibria in the binary systems n-decane+(-)-menthone and n-decane+(+)-fenchone at temperatures between 344,45 and 390,75 K // Fluid Phase Equilibria. – 2002. – V. 198, 1. – P. 111-121.

**SORPTION AND THERMODYNAMIC  
PROPERTIES OF AROMATIC PLANTS  
AS DRYING OBJECTS**

**Sniezhkin Yu.F.<sup>1</sup>, Dabizha N.O.<sup>2</sup>, Dmytrenko N.V.<sup>3</sup>,  
Malashchuk N.S.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>, [Isnezhkin@gmail.com](mailto:Isnezhkin@gmail.com)*

<sup>2</sup>*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0001-6124-1981>, [dabizha.nataliia@gmail.com](mailto:dabizha.nataliia@gmail.com)*

<sup>3</sup>*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-4520-4205>, [nat4al@ukr.net](mailto:nat4al@ukr.net)*

<sup>4</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, <http://orcid.org/0000-0002-8648-1006>, [malashchuk\\_n@ukr.net](mailto:malashchuk_n@ukr.net)*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.1>

The high demand for aromatic herbs in the biotechnological, cosmetic, pharmaceutical and food industries led to increased requirements for the technological processes of processing aromatic raw materials to preserve biologically active substances and essential oils. Peppermint (*Mentha piperita* L.) is a well-known medicinal essential oil crop that is widely distributed throughout Ukraine. It is widely used due to its beneficial properties and therapeutic effect on the human body.

The purpose of the article is studies of sorption and thermodynamic properties of aromatic plants to determine technological parameters of drying and storage processes, which ensure minimum specific energy consumption and maximum preservation of essential oils.

The results of study on sorption properties of peppermint leaves are presented. Adsorption moisture isotherms of peppermint leaves were determined at three different temperatures 30, 40 and 50 °C, using the standard gravimetric static method. The net isosteric heat of adsorption was calculated from moisture isotherms, using the Clausius-Clapeyron equation.

The specific heat consumption for drying peppermint leaves at temperatures of 40 and 50 °C was obtained experimentally, using the differential microcalorimeter of evaporation. The effect of volatile substances of peppermint essential oil on the heat of vaporization was revealed.

The choice of drying temperature of aromatic plants is primarily determined by the thermal sensitivity of essential oils. The study of the effect of drying temperature on the removal of volatile aromatic compounds from peppermint leaves showed that the maximum allowable temperature of the material during dehydration should not exceed the melting point of menthol at 42,5 °C.

Bibliograph. 17, figures 4.

**Key words:** aromatic herbs, peppermint, drying, adsorption, heat evaporation of water.

1. FAOSTAT. Access mode: <https://www.fao.org/faostat/r/#data/QCL>.

2. 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. V. 9, I. 3. P.1519-1528. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525>.

3. Kovalov V.M., Pavlii O.I., Isakova T.I. Farmakohnoziya z osnovamy biokhimiyyi roslyn [Pharmacognosy with the basics of plant biochemisry]. [Kharkiv: «Prapor» NFAU], 2000. 704 p. (in Ukr.)

4. *European Pharmacopoeia* 8th Edition (Ph. Eur. 8), Council of Europe. Strasbourg, 2014.

5. Minarchenko V.M., Butko A.Yu. Doslidzhennya vitchyznyanoho rynku likarskykh zasobiv roslynnoho pokhodzhennya [Research of the domestic market of medicinal products of herbal origin] // [Farmatsevychnyy zhurnal], 2017. № 1. P. 30-36. (in Ukr.)

6. 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. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>.

7. 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.

8. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O., Iliencko O.O., Loveiko V.O. Sushynnya myaty na konvektyvnykh sushylnykh ustanovkakh [Drying of mint on convective dryers] // [Food industry], 2010. V. 9. P. 168-17. (in Ukr.)

9. 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. <http://dx.doi.org/10.1080/0972060X.2017.1371647>

10. *Lykov A.V.* Тепло- і масообмен в процесах сушки [Heat and mass exchange in drying processes]. М.-Л.: Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatelstvo, 1956. 464 p. (in Rus.)
11. *Snieszkin Yu.F., Dabizha N.O., Malashchuk N.S.* Enerhoresursozberihayuchi tekhnolohiyi znevodnennya likars'kykh ta pryano-aromatychnykh roslyn [Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants] // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2021. V. 43, №4. P. 7-16. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.1>. (in Ukr.)
12. *Gregg S.J., Sing K.S.W.* Adsorption, surface area and porosity. Academic Press, 1982. 306 p.
13. *Al-muhtaseb A.H., McMinn W.A.M., Magee T.R.A.* Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review // *Trans IChemE*, 2002.V. 80, Part C. P. 118-128.
14. *Dmytrenko N.V., Ivanov S.O., Snezhkin Yu.F., Dekusha L.V.* Doslidzhennya teplofizychnykh kharakterystyk pahoniv verby za dopomohoyu ustanovky synkhronnoho teplovoho analizu [Research of thermal characteristics of willow shoots by device of synchronous thermal analysis] // [Industrial heat engineering], 2015. V. 37, №2. P. 77-84. (in Ukr.)
15. *Chickos J.S., Garin D.L., Hitt M., Schilling G.* Some solid state properties of enantiomers and their racemates // *Tetrahedron*, 1981. V. 37. P. 2255-2259.
16. *Hoskovec M., Grygarová D., Cvacka J., Streinz L., Zima J., Verevkin S., Koutek B.* Determining the vapour pressures of plant volatiles from gas chromatographic retention data // *Journal of Chromatography*, 2005. V. 1083 (1-2). P. 161-172.
17. *Batiu I.* Vapor-liquid equilibria in the binary systems n-decane+(-)-menthone and n-decane+(+)-fenchone at temperatures between 344,45 and 390,75 K // *Fluid Phase Equilibria*, 2002. V. 198, 1. P. 111-121.

Отримано 13.04.2023

Received 13.04.2023