
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ М'ЯТИ ПЕРЦЕВОЇ (MENTHA PIPERITA L.) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СУШАРКИ

Дабіжа Н. О., Дмитренко Н. В., Малащук Н. С.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-697-3-21>

ВСТУП

В умовах сучасності на світовому ринку продуктів рослинного походження наявний підвищений попит на лікарську та ароматичну сировину, яка є складником продукції фармацевтичного, парфумерно-косметичного, харчового виробництв. Так, у харчовій індустрії потреба в цій сировині у світі за останні 10 років збільшилася практично в 6 разів, а обсяги виробництва з неї приправ, ароматизаторів, барвників тощо зростають щорічно на 20...30%¹. За оцінками експертів, близько 25% лікарських засобів, що застосовують у світовій медичній практиці, отримують безпосередньо з лікарської рослинної сировини. Зміщення пріоритетів у бік використання лікарських і ефіроолійних рослин пов'язано з їхньою високою біологічною активністю, антиоксидантними, бактерицидними властивостями, що актуально у сучасному світі для захисної, антимутагенної, імуномодельючої дії на організм людини. Отже, для досягнення сталого розвитку лікарське та ефіроносне рослинництво відіграє важливу роль у світовій економіці та фактично стало окремим напрямом підприємницької діяльності. Україна є потужним виробником лікарської та ефіроносної рослинної сировини, яку заготовляють близько 200 тис. тонн на рік².

Свіжозібрана рослинна сировина містить (85...90)% води, через високий вміст вологи розмножуються мікроорганізми та відбуваються біохімічні реакції, що призводить до погіршення якості, тому безпечне зберігання свіжих рослин протягом тривалого часу неможливе. Важливим

¹ Sniezhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. Т. 43. № 4. С. 7–16. DOI: 10.31472/ttpe.4.2021.1.

² Товарознавство та інноваційні технології переробки лікарсько-технічної рослинної сировини : навчальний посібник / Павлюк Р. Ю. та ін. Харків : ХГУПТ, 2013. 429 с.

етапом у процесі заготівлі лікарських та ефіроолійних рослин є сушіння, яке запобігає псуванню сировини та збільшує термін зберігання висушеної трави^{3, 4}.

Сушіння лікарських і ефіроолійних трав здійснюється природним повітряно-тіньовим способом або нагрітим повітрям у сушильних установках. Під час природного сушіння процес зневоднення суттєво залежить від тепловологісних параметрів атмосферного повітря, які в нестабільних кліматичних умовах України змінюються в широкому діапазоні, що не дозволяє проводити зневоднення у сталих оптимальних умовах і призводить до неможливості одержати кінцевий продукт з необхідними якісними показниками. Сушіння нагрітим повітрям має низку переваг: у сушарках можна регулювати температурний режим процесу, швидкість та вологовміст сушильного агента. Організація контрольованого процесу сушіння дозволяє реалізувати оптимальні з точки зору збереження біологічно активних речовин рослинної сировини режими⁵. Для більш ефективного та контрольованого сушіння лікарських та ефіроолійних рослин натеper з'явилися нові методи сушіння, які забезпечують можливість зберігання насамперед ефірних олій та підвищення стабільності висушеного продукту^{6, 7, 8}. До цих методів належать такі як гібридне сонячне сушіння, сублімаційне сушіння, мікрохвильове сушіння, мікрохвильове вакуумне сушіння, сушіння за допомогою інфрачервоного випромінювання, сушіння тепловим насосом та надкритичне сушіння CO₂, а також гібридні методи сушіння.

Водночас сушіння є найбільш енергоємним процесом серед основних промислових процесів, на який припадає від 12 до 20% від загального

³ Chakraborty R., Tilottama D. Drying protocols for traditional medicinal herbs: A Critical Review. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*. 2016. Vol. 4. No. 4. P. 312–319.

⁴ Nakra S., Tripathy S., Srivastav P. P. Drying as a preservation strategy for medicinal plants: Physicochemical and functional outcomes for food and human health. *Phytomedicine Plus*. 2025. Vol. 5. No. 2. Article 100762. DOI: 10.1016/j.phyplu.2025.100762.

⁵ 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. Vol. 61. No. 11. P. 1763–1786. DOI: 10.1080/10408398.2020.1765309.

⁶ Sniezhkin Yu. Energy-efficient dryers developed at the Institute of engineering thermophysics of NAS of Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2025. Vol. 50. No. 4. P. 5–17. DOI: 10.31472/tpe.4.2025.1.

⁷ Nurhaslina C. R., Bacho S. A., Mustapa A. N. Review on drying methods for herbal plants. *Materials Today : Proceedings*. 2022. Vol. 63. P. S122–S139. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.052.

⁸ Eapen A. S., Bhosale Y. K., Roy S. A review on novel techniques used for drying medicinal plants and its applications. *International Journal of Biomaterials*. 2025. Article ID 4533070. 21 p. DOI: 10.1155/ijbm/4533070.

споживання енергії у виробничому секторі⁹, та має, відповідно, високий вуглецевий слід. Підвищення енергоефективності процесу сушіння та сушильних установок сприяє сталому розвитку з точки зору глобальної енергетичної перспективи.

Однією з широко використовуваних лікарських ефіроолійних культур є м'ята перцева (*Mentha piperita* L.). Слід зазначити, що світове виробництво м'яти перцевої становило у середньому 105 038 т у 2015–2018 рр., у тому числі у Східній Європі – 176 т¹⁰.

М'ята перцева – швидкопсувна сезонна рослина, щоб зробити м'яту доступною для використання протягом усього року, її необхідно зберегти. Найкращим способом збереження є конвективне низькотемпературне сушіння, під час якого зменшення вологовмісту матеріалу дозволяє досягти на поверхні рослини такого рівня активності води, за якого унеможливаються мікробне псування та будь-які біохімічні реакції.

Метою дослідження є вивчення кінетики процесу зневоднення м'яти перцевої, розроблення енергоефективних режимів сушіння, за яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій, вибір та вдосконалення сушильної установки.

Методологія дослідження ґрунтується на комплексному підході, який поєднує всебічне дослідження властивостей м'яти перцевої як об'єкта сушіння для визначення режимів зневоднення із мінімальними втратами ефірних олій з обґрунтуванням методу інтенсифікації та вибором способу сушіння.

Для досягнення поставленої мети проведені дослідження, що спрямовані на вибір гранично допустимої температури нагріву матеріалу, визначення сорбційних властивостей м'яти перцевої та питомих витрат енергії на її зневоднення, а також вивчена кінетика сушіння за різних тепловолігісних параметрів сушильного агента.

1. Характеристика м'яти перцевої як об'єкта сушіння

М'ята перцева (*Mentha piperita* L.) є відомою лікарською ефіроолійною культурою, яку широко застосовують завдяки корисним властивостям і терапевтичній дії на організм людини. М'ята перцева є джерелом одержання аптечного листя та ефірної олії, а також її компонентів, зокрема ментолу, що використовуються у хіміко-фармацевтичній,

⁹ Eapen A. S., Bhosale Y. K., Roy S. A review on novel techniques used for drying medicinal plants and its applications. *International Journal of Biomaterials*. 2025. Article ID 4533070. 21 p. DOI: 10.1155/ijbm/4533070.

¹⁰ FAOSTAT. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL> (дата звернення: 23.02.2026).

парфумерно-косметичній, кондитерській, харчовій, лікero-горілчаній, тютюновій промисловостях та медицині¹¹.

Листя м'яти здебільшого споживають у свіжому або сушеному вигляді як ароматизатор у різних видах харчових продуктів, у чайних напоях. У медицині м'ята перцева визнана у світі насамперед своїми антимікробними та антиоксидантними властивостями, також широко відомі такі її лікувальні властивості, як протівірусні, антибактеріальні, протизапальні, протигрибкові, протиастматичні, алопатичні, спазмолітичні, антисептичні тощо¹². 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 як інгредієнт чи основний компонент входить до складу 63 лікарських засобів¹³.

Основним активним компонентом м'яти перцевої є ефірна олія – багатокомпонентна суміш летких органічних сполук, концентрація якої в листках м'яти коливається від 1,2% до 4,8%, а у суцвіттях досягає 6%¹⁴. У 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)%, α -пінен (1,0...1,5)%, β -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%), ізопулегон (до 0,2%)¹⁵. Інші групи біологічно активних речовин м'яти перцевої – флавоноїди (гесперидин, антоціанідини), дубильні речовини (6...12)%, тритерпеноїди (урсолова та олеанолова кислоти), бетаїн, каротиноїди¹⁶. Також м'ята є багатим джерелом мінералів, таких як Na, Mg, K, Ca, Cr, Fe, Co, Cu, Zn і Se¹⁷.

¹¹ Nayak P., Kumar T., Gupta A. K., Joshi N. U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020. Vol. 9. No 3. P. 1519–1528. DOI: 10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525.

¹² Ковальов В. М., Павлій О. І., Ісакова Т. І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. Харків : Прапор НФАУ, 2000. 704 с.

¹³ Мінарченко В. М., Бутко А. Ю. Дослідження вітчизняного ринку лікарських засобів рослинного походження. *Фармацевтичний журнал*. 2017. № 1. С. 30–36. DOI: 0.32352/0367-3057.1.17.04.

¹⁴ Ковальов В. М., Павлій О. І., Ісакова Т. І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. Харків : Прапор НФАУ, 2000. 704 с.

¹⁵ European Pharmacopoeia. 8th edition (Ph. Eur. 8). Strasbourg : Council of Europe, 2014. P. 275–276, 1232–1234, 1350–1352, 1369–1370.

¹⁶ Ковальов В. М., Павлій О. І., Ісакова Т. І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. Харків : Прапор НФАУ, 2000. 704 с.

¹⁷ Nayak P., Kumar T., Gupta A. K., Joshi N. U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 1519–1528. DOI: 10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525.

Леткі ароматичні сполуки є найбільш чутливими компонентами в процесі сушіння ефіроолійної сировини, 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.

Ефірна олія в ефіроносній траві знаходиться на поверхні листя в ефіроолійних залозах (трихомах)¹⁸. У разі високої температури сушіння трихоми можуть розірватися, що призведе до втрати летких сполук через випаровування. Тому збереження цілісності трихоми або мінімізація її пошкодження під час сушіння сприяє утриманню ефірних олій у сушеній траві.

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 ефіроолійної сировини проаналізовані експериментальні дані щодо впливу температури на вміст ароматичних речовин. Наприклад, дослідження впливу сушіння на вміст ефірної олії в листках меліси¹⁹ показали, що втрати ефірної олії пропорційні температурі сушіння (16%, 23% та 65% у разі 30°C, 45°C та 60°C відповідно), а виражені зміни складу основних компонентів ефірної олії відбуваються за 60°C. У дослідженні²⁰ вивчений 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% у разі 40°C до 0,14% у разі 60°C і 0,12% у разі 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 материнці²¹. Добре корелюють з вище наведеними даними отримані в ІТТФ НАНУ результати дослідження впливу температури зневоднення на число аромату м'яти

¹⁸ Thamkaew G., Sjöholm L., Galindo F. G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. Vol. 61. No. 11. P. 1763–1786. DOI: 10.1080/10408398.2020.1765309.

¹⁹ Nayak P., Kumar T., Gupta A. K., Joshi N. U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020. Vol. 9. No 3. P. 1519–1528. DOI: 10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525.

²⁰ 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. Vol. 569. P. 95–98.

²¹ Chakraborty R., Tilottama D. Drying protocols for traditional medicinal herbs: A Critical Review. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*. 2016. Vol. 4. No. 4. P. 312–319.

і чабера²². Виявлено, що підвищення температури теплоносія з 40 °С до 60 °С призводить до втрати аромату сушеної м'яти на 20%, а чабера – на 29%. Подальше підвищення температури сушіння на 20 °С призводить до ще більших втрат – 42% і 61% відповідно. У статті²³ наведені результати дослідження впливу температури сушіння і швидкості повітря на вміст ефірних олій у листках м'яти водяної. Експеримент проводився за трьох температур сушильного агента – 40 °С, 50 °С і 60 °С і його швидкості 1 м/с і 2 м/с. Найвищий вміст ефірної олії (1,33% об./мас.) спостерігався за температури 40 °С і швидкості 1 м/с. Збільшення температури і швидкості теплоносія призводили до значних втрат ефірних олій.

Таким чином, вибір параметрів процесу зневоднення м'яти перцевої як ефіроолійної рослини насамперед визначається термочутливістю ефірних олій: для запобігання втрат летких речовин гранично допустима температура матеріалу не повинна перевищувати (35...40) °С під час сушіння нагрітим повітрям у шарі. Також рекомендується сушити м'яту в товстому шарі. Бажано, щоб процес сушіння був затягнутий у часі, це пов'язано з тим, що під час зневоднення в рослинній сировині триває процес біогенезу і накопичення ефірної олії²⁴.

Отже, з характерних особливостей м'яти перцевої як об'єкта сушіння насамперед необхідно виділити термочутливість летких речовин ефірної олії і високий початковий вологовміст. У зв'язку з тим, що тривала теплова дія негативно позначається на якості висушеної трави під час розроблення режимів зневоднення м'яти перцевої основний акцент повинен робитися на використання низьких температур і скорочення тривалості процесу.

2. Матеріали та методи

Під час проведення досліджень використовувалась свіжа трава м'яти перцевої (*Mentha piperita* L.), придбана у місцевого виробника в Україні.

Вміст вологи в досліджуваному матеріалі визначали за ДСТУ 7804:2015 шляхом сушіння зразків у бюксах до постійної маси у сушильній шафі з температурою (100...105) °С, фіксуючи масу бюкси з навішенням до висушування m_1 , масу бюкси з навішенням після висушування m_2 , масу пустої бюкси m_0 .

²² 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.

²³ 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. Vol. 20. No. 4. P. 1131–1136. DOI: 10.1080/0972060X.2017.1371647.

²⁴ Sniezhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. T. 43. No. 4. C. 7–16. DOI: 10.31472/ttpe.4.2021.1.

Під час вирішення задач, що пов'язані зі змінюванням кількості вологи в матеріалі в процесі його сушіння та в розрахунках швидкості сушіння, використовувався вологовміст u – відношення маси вологи m_b до маси сухого матеріалу $m_{c.m.}$, кг/кг с.м.:

$$u = \frac{m_b}{m_{c.m.}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0}. \quad (1)$$

Для визначення маси сухого матеріалу розрахунки проводили за відносною вологістю w – відношенням маси вологи m_b до маси вологого матеріалу m , %:

$$w = \frac{m_b}{m} \cdot 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100. \quad (2)$$

Перехід від вологовмісту u до відносної вологості w і від відносної вологості w до вологовмісту u здійснюється за такими формулами:

$$u = \frac{w}{100 - w} \text{ та } w = \frac{u}{1 + u}. \quad (3)$$

Початкове значення вологості листя м'яти перцевої у свіжому стані варіювалось у межах для стебел з листками (88,3...91,2)%, для листків і стебел (75,6...77,9)% та (88,7...91,7)% відповідно.

Дослідження гігротермічного рівноважного стану м'яти перцевої проводилися із застосуванням тензометричного (статичного) методу Ван Бамелена²⁵. Згідно з методом зразки висушеного матеріалу в бюксах витримувалися в ексикаторах над водними розчинами сірчаної кислоти. За певної температури та концентрації сірчаної кислоти в ексикаторі встановлюється парціальний тиск пари p , що відповідає цій концентрації та відносному тиску p/p_s . Відносна вологість повітря визначається як $\varphi = (p/p_s) \cdot 100$. Зразки періодично зважуються на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г до моменту досягнення ними постійної маси, що свідчить про настання стану динамічної рівноваги за такої температури й відносної вологості повітря. Рівноважний вологовміст матеріалу u_p визначається як відношення маси вологи в матеріалі в рівноважному стані до маси сухого матеріалу.

²⁵ Дабіжа Н. О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Київ : ІТТФ НАН України, 2013. 208 с.

Для визначення питомої теплоти випаровування води застосовано створений у ІТТФ НАНУ диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01²⁶, принцип роботи якого заснований на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу через випаровування та кількості тепла, що витрачене на це випаровування. Прилад являє собою сукупність функціонально поєднаних теплового блоку з калориметричною платформою, аналітичних ваг, компресора для продувки повітря, блоку електронного керування та персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням.

Для дослідів з листям м'яти було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм. У ній перетворювачі теплового потоку розміщені вздовж периметру стінок комірок. Цілий листок м'яти скручувався у м'який рулон та вміщувався у вимірювальну комірку. Ізотермічне кондуктивне сушіння відбувалось у калориметричній камері за температур 40 °C та 50 °C до моменту досягнення матеріалом вологості, що рівноважна з повітрям всередині камери.

Питому теплоту випаровування визначали з точністю не менше 1% за власною методикою, заснованою на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння. Поточні значення питомих витрат теплоти на випаровування вологи зі зразка під час сушіння вираховували після закінчення дослідів за формулою (4):

$$r_i = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_{i+1})}, \quad (4)$$

де r_i – питомі витрати теплоти на випаровування за час сушіння від τ_i до τ_{i+1} , кДж/кг; τ_i та τ_{i+1} – поточні моменти часу процесу сушіння, с; $q(\tau)$ – тепловий потік всередині робочої камери як функція часу, кДж/с; $m(\tau_i)$ та $m(\tau_{i+1})$ – маса зразка в моменти часу τ_i та τ_{i+1} , кг.

Дослідження процесу зневоднення м'яти перцевої з метою вивчення кінетичних закономірностей проводилися на експериментальному сушильному стенді з конвективним підведенням теплоти в горизонтальній камері у разі подовжнього обтікання шару матеріалу сушильним агентом²⁷. Стенд складається із системи теплоізольованих

²⁶ Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів: пат. 84075 Україна: МПК G 01N 25/26, G 01N 25/28. № a200613266; заявл. 15.12.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. 10 с.

²⁷ Гусарова О. В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Київ : ІТТФ НАН України, 2020. 241 с.

повітропроводів з пристроями для нагрівання сушильного агента, сушильної камери, системи контролю і підтримання температури сушильного агента на заданому рівні та системи автоматичного збору й обробки інформації. Після встановлення режиму сушіння підготовлені зразки розміщували на сітчастому піддоні робочої вимірювальної камери та вмикали комп'ютер для збору інформації за допомогою програми “Sooshka”, яка реєструє та виводить на екран температуру сушильного агента t_c , температуру зразка t та змінювання маси зразка m під час зневоднення.

Дослідження кінетики сушіння м'яти перцевої проводились окремо для листків, стебел та цілої рослини (стебла з листками). Стебла м'яти з листками різали на шматки довжиною 10...12 см і викладали їх на піддон шаром 2...2,5 см, листя або стебла викладали шаром 1 см. Дослідження проводилися в межах змінювання режимних параметрів процесу: температури сушильного агента – 30 °C, 40 °C і 50 °C; швидкості сушильного агента – 2 м/с; вологовмісту сушильного агента – (6...14) г/кг с.п.; питомого навантаження матеріалу – 1,7 кг/м². За експериментальними даними побудовані криві сушіння м'яти перцевої $u = f(\tau)$ і температурні криві $t = f(\tau)$, та одержані шляхом чисельного диференціювання кривих сушіння криві швидкості сушіння $du/d\tau = f(u)$.

3. Результати експериментальних досліджень

Під час вивчення технологічних властивостей матеріалів велике значення має аналіз ізотерм адсорбції, що представляють функціональну залежність між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу у разі постійних температур і тиску. Під час сушіння для досягнення бажаного результату температура та вологість сушильного агента повинні відповідати заданому кінцевому вологовмісту матеріалу. Саме за ізотермами адсорбції встановлюється зв'язок між тепловолігісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу в процесі сушіння²⁸.

Тензометричним (статичним) методом Ван Бамелена за температури 30 °C одержана ізотерма адсорбції пари води м'ятою перцевою, яка має форму, характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів (рис. 1а). Використовуючи метод характеристичних кривих²⁹, заснований

²⁸ Снежкін Ю. Ф., Дабіжа Н. О. Дослідження адсорбційних характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів з метою визначення режимів сушіння. *Промислова теплотехніка*. 2000. Т. 22. № 3. С. 26–29.

²⁹ Загоруйко В. А., Голіков О. А., Слинько О. Г. Термодинаміка та теплофізика вологих матеріалів. Київ : Наукова думка, 1995. 296 с.

на потенційній теорії сорбції, за цією ізотермою визначили максимальний гігроскопічний вологовміст м'яти $u_{os} = 0,432$ кг/кг с.м. та розрахували значення рівноважних вологовмістів для 40 °С та 50 °С.

Для апроксимації ізотерм адсорбції пари води м'ятою перцевою використана модель Гуттенгейма-Андерсона-де Бура (ГАБ)³⁰. Рівняння ГАБ для ізотерми може бути представлено у вигляді

$$u = \frac{u_m C k (p/p_s)}{(1 - k(p/p_s))(1 - k(p/p_s) + C k (p/p_s))}, \quad (5)$$

де u – рівноважний вологовміст матеріалу, кг/кг с.м.; u_m – вологовміст матеріалу у разі повного заповнення поверхні шаром в одну молекулу води кг/кг с.м.; p/p_s – відносний тиск; C – константа Гуттенгейма; k – поправочний коефіцієнт, що коректує вплив полішару.

Величини коефіцієнтів рівняння ГАБ надані в таблиці 1. Адекватність рівняння ГАБ визначена з використанням нелінійного коефіцієнта регресії (R^2).

Таблиця 1

Величини коефіцієнтів рівняння ГАБ для ізотерм адсорбції м'яти перцевої

Матеріал	Діапазон p/p_s	t , °С	u_m	C	k
М'ята	0–0,7	30	0,065	41,86	1,206
		40	0,057	5,57	1,206
		50	0,052	2,29	1,207

Ізотерми відображають стан матеріалу в гігроскопічній області (зона зв'язаної води), де можна виділити (рис. 1а) 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 (вологовміст матеріалу нижче 0,10 кг/кг с.м.) 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 потемніння, в цьому інтервалі вологовміст матеріалу становить (0,10...0,16) кг/кг с.м. 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

³⁰ Quirijns E. J., van Boxtel A. J., van Loon W. K., van Straten G. Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2005. Vol. 85. P. 1805–1814. DOI: 10.1002/jsfa.2140.

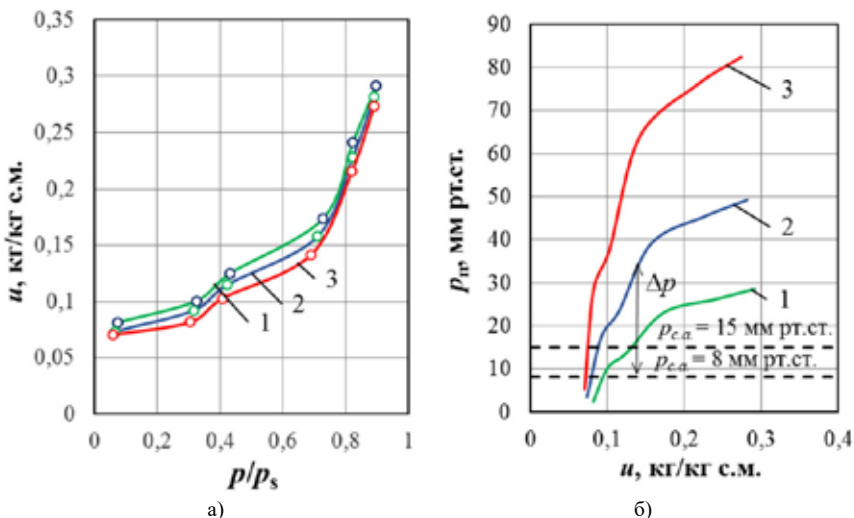


Рис. 1. Ізотерми адсорбції пари води м'ятою перцевою (а) та залежність парціального тиску пари води на поверхні матеріалу від вологовмісту і температури (б): 1 – 30 °С; 2 – 40 °С; 3 – 50 °С

повинен перевищувати 0,16 кг/кг с.м., у разі вологовмісту меншого ніж 0,10 кг/кг с.м. унеможливаються будь-які біохімічні реакції³¹.

Для забезпечення високої якості висушеної м'яти перцевої основне завдання сушіння полягає в максимальному збереженні ефірних олій, а також у припиненні руйнівної дії ферментів або в зменшенні її до мінімуму. Тому м'яту перцеву необхідно сушити до залишкового вологовмісту, що не перевищує 0,10 кг/кг с.м., висушений матеріал слід упаковувати в герметичну тару та зберігати в чистому, сухому, прохолодному, добре провітрюваному приміщенні, в якому необхідно забезпечити контроль вологості й температури повітря³².

Слід зазначити, що в гігроскопічній області (зоні зв'язаної води) тиск пари води над поверхнею матеріалу відрізняється від тиску насичення і залежить від його вологості й температури. За отриманими ізотермами адсорбції пари води м'ятою перцевою у вигляді залежності $u = f(p/p_s, t)$,

³¹ Sniezhkin Yu., Dabizha N., Dmytrenko N., Malashchuk N. Sorption and thermodynamic properties of aromatic plants as drying objects. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. T. 45. No. 2. C. 5–14. DOI: 10.31472/ttpe.2.2023.1.

³² Sniezhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. T. 43. No. 4. C. 7–16. DOI: 10.31472/ttpe.4.2021.1.

використовуючи $p_s = f(t)$, зображуємо ізотерми адсорбції у системі координат $p_n - u$ (рис. 1б).

Для запобігання втрати ароматичних речовин зневоднення м'яти перцевої необхідно проводити за низьких температур. Для такого «м'якого» довготривалого процесу сушіння справедлива гіпотеза про локальну термодинамічну рівновагу, згідно з якою в кожен малий проміжок часу на кордоні розділу фаз встановлюється рівновага. Умови локальної рівноваги з'ясовуються 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. 1б) встановлено, що в гігроскопічній області у міру зменшення вологовмісту матеріалу і у разі зниження його температури тиск пари води на поверхні зменшується і у разі наближення до вологовмісту 0,10 кг/кг с.м. стає сумірним з тиском у навколишньому пароповітряному середовищі.

За ізотермами адсорбції визначають тепловологісні параметри сушильного агента, за яких можна 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 10 г/кг с.п. 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, за температури сушильного агента 40°C його вологість буде змінюватись згідно з $H-d$ діаграмі вологого повітря в діапазоні ϕ від 18% до 42%, таким умовам відповідає рівноважний вологовміст матеріалу в межах (8...12)%. У разі 50 °C вологість сушильного агента змінюється від 10% до 25%, а рівноважний вологовміст – у межах (7...8)%. Аналіз гігротермічної рівноваги м'яти перцевої показав, що за температури 40 °C і високої відносної вологості сушильного агента більше ніж 38% неможливо досушити м'яту до заданого залишкового вологовмісту 0,10 кг/кг с.м., тому що матеріал досягає стану рівноваги із сушильним агентом раніше, і процес зневоднення припиняється. Таким чином, на заключному етапі сушіння під час видалення адсорбційно-зв'язаної вологи вологовміст сушильного агента за температури 40 °C не повинен перевищувати 17 г/кг с.п.

Користуючись ізотермами адсорбції, можна одержати дані щодо теплоти випаровування вологи різних форм і видів зв'язку з матеріалом. Рослинні тканини утримують, крім вологи з фізико-механічною формою

зв'язку, й адсорбційно-зв'язану вологу³³. Для видалення адсорбційно-зв'язаної вологи необхідно підвести до матеріалу більше енергії, ніж під час випаровування вільної води. Загальні витрати енергії на видалення вологи під час сушіння визначаються як сума питомої теплоти випаровування вільної води r і чистої теплоти адсорбції q_a : $q = r + q_a$ ³⁴.

Знання теплоти адсорбції має велике значення у разі проєктування обладнання для зневоднення та у разі розроблення енергоефективних режимів сушіння м'яси перцевої. Це пов'язано з тим, що теплота випаровування сорбованої води може зростати до значень, що перевищують теплоту пароутворення чистої води, оскільки рослинна сировина зневоднюється до низького залишкового вологовмісту (0,05...0,15) кг/кг с.м., за якого вода в матеріалі перебуває у зв'язаному стані.

Нині для визначення теплоти адсорбції харчових продуктів використовуються два методи³⁵:

- прямий метод калориметричного вимірювання теплоти, що виділяється під час сорбції;
- термодинамічний метод із застосуванням рівняння Клаузіуса-Клейперона з визначенням чистої ізостеричної теплоти адсорбції q_a .

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, кДж/кг³⁶:

$$\frac{(\partial \ln p)}{(\partial \ln T)} = \frac{q_{st}}{(RT^2)}, \quad (6)$$

де p – тиск, мм рт.ст.; T – температура, К; R – газова стала, кДж/(кг · К).

За ізотермами адсорбції, одержаними за двох і більше температур, після заміни в рівнянні (6) рівноважного тиску p на відношення $p/ps = \phi$, використовуючи інтегральну форму рівняння Клаузіуса-Клапейрона,

³³ Снежкін Ю. Ф., Дабіжа Н. О. Дослідження адсорбційних характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів з метою визначення режимів сушіння. *Промислова теплотехніка*. 2000. Т. 22. № 3. С. 26–29.

³⁴ Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, surface area and porosity. London; New York : Academic Press, 1982. 306 p.

³⁵ Al-Muhtaseb A. H., McMinn W. A. M., Magee T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products : a review. *Trans IChemE*. 2002. Vol. 80. Part C. P. 118–128. DOI:10.1205/09603080252938753.

³⁶ Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, surface area and porosity. London; New York : Academic Press, 1982. 306 p.

визначається чиста теплота адсорбції q_a для фіксованих значень вологовмісту за рівнянням, кДж/кг:

$$q_a = \left[\ln \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right) / \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] R. \quad (7)$$

На рис. 2а наведена залежність чистої ізостеричної теплоти адсорбції, що розрахована для температури 40°C, від вологовмісту матеріалу³⁷. Як видно, теплота адсорбції в області слабо зв'язаної води поступово зменшується зі зменшенням вологовмісту, в діапазоні від 0,24 кг/кг с.м. до 0,20 кг/кг с.м. 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. Питома теплота випаровування q слабо зв'язаної води незначно перевищує теплоту паротворення. Витрати ж енергії на випаровування адсорбційно-зв'язаної вологи збільшуються у разі досягнення матеріалом вологовмісту 0,12 кг/кг с.м. на 29% порівняно з теплою паротворення вільної води, тобто відношення $q / r = 1,29$.

У 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 (вміст (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 у нормальних умовах становить 315,60 К (42,5 °C), а ентальпії випаровування та сублімації становлять $\Delta_{\text{vap}}H = 56,37$ кДж/моль та $\Delta_{\text{sub}}H = 95,8$ кДж/моль відповідно^{38, 39}. Друга основна летка сполука ефірної олії (вміст (14...32)%) – ментон, який являє собою безбарвну

³⁷ Sniezhkin Yu., Dabizha N., Dmytrenko N., Malashchuk N. (2023). Sorption and thermodynamic properties of aromatic plants as drying objects. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. T. 45. No. 2. C. 5–14. DOI: 10.31472/tpe.2.2023.1.

³⁸ Chickos J. S., Garin D. L., Hitt M., Schilling G. Some solid state properties of enantiomers and their racemates. *Tetrahedron*. 1981. Vol. 37. P. 2255–2259. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)97981-5.

³⁹ 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. No. 1–2. P. 161–172. DOI: 10.1016/j.chroma.2005.06.006.

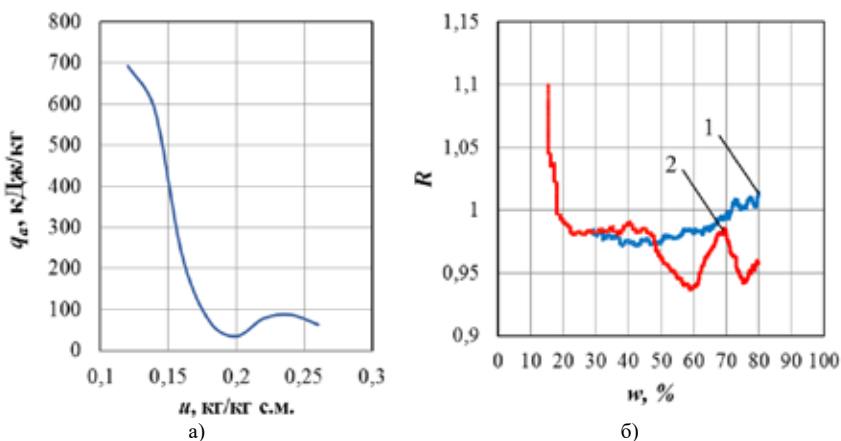


Рис. 2. Чиста ізостерична теплота адсорбції пари води м'ятою перцевою (а) та питомі витрати теплоти на висушування листя м'яти перцевої за температур сушіння (б): 1 – 40 °С; 2 – 50 °С

рідину з м'ятним запахом. Ентальпія випаровування ментону становить $\Delta_{\text{вар}} H = 50,1 \text{ кДж/моль}^{40}$.

Дослідження витрат енергії на зневоднення в процесі теплового сушіння листя м'яти перцевої проводилось 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. 2б у координатах значень питомих витрат теплоти на сушіння, приведених до питомої теплоти випаровування чистої води за відповідної температури ($R = q_{\text{витрачене}} / r_{\text{води}}$)⁴¹.

Експериментально отримані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти за температури 40 °С (рис. 2б, 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.

⁴⁰ 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. Vol. 198. No. 1. P. 111–121. DOI: 10.1016/S0378-3812(01)00759-2.

⁴¹ Dmytrenko N. V., Malashchuk N. S., Dabizha N. O., Ivanov S. O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves. *Scientific forum: theory and practice of research* : II International Scientific and Theoretical Conference, Valencia, Spain, 2022. DOI: 10.36074/scientia-16.09.2022.

Тому до процесу випаровування води приєднується процес випаровування летких ароматичних сполук із 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 видаляється з калориметричної камери. Виділення летких ароматичних сполук з листя відбувається протягом усього подальшого процесу сушіння монотонно, паралельно з видаленням вільної води.

Експериментально отримані значення питомих витрат теплоти на висушування листя м'яти за температури 50 °C (рис. 2б, крива 2) вказують на значне випаровування летких сполук із самого початку процесу. Також на кривій витрат теплоти спостерігаємо ендотермічні піки, можливо, зумовлені 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 леткої сполуки. Подальша (після досягнення вологості 45%) відповідність кривої витрат теплоти за 50 °C значенням кривої витрат теплоти за 40 °C свідчить про подальше випаровування ментолу, концентрація якого в ефірних оліях м'яти 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 речовин⁴². Цей момент добре погоджується зі зростанням чистої ізотеричної теплоти адсорбції в області адсорбційно-зв'язаної вологи (рис. 2а).

Дослідження основних закономірностей тепло- і масообміну у разі сушіння м'яти перцевої проводилися на експериментальному конвективному сушильному стенді. Кінетику сушіння листків та стебел м'яти досліджували в одиничному шарі.

Встановлено, що підвищення температури сушильного агента із 30 °C до 40 °C сприяє скороченню тривалості сушіння листків м'яти до вологовмісту матеріалу 0,10 кг/кг с.м. з 1010 до 620 хв (тобто у 1,6 раза), а збільшення температури з 40 °C до 50 °C приводить до зменшення тривалості сушіння з 620 до 310 хв (у 2 рази). Швидкість сушіння листків м'яти в початковий момент за температури сушильного агента 50 °C у 4 рази вища, ніж за 30 °C (рис 3а).

⁴² Dmytrenko N. V., Malashchuk N. S., Dabizha N. O., Ivanov S. O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves. *Scientific forum: theory and practice of research* : II International Scientific and Theoretical Conference, Valencia, Spain, 2022. DOI: 10.36074/scientia-16.09.2022.

Стебла м'яти мають більший початковий вологовміст і сохнуть до залишкового вологовмісту 0,10 кг/кг с.м. значно довше. Встановлено, що підвищення температури сушильного агента із 30 °С до 40 °С сприяє скороченню тривалості сушіння стебел м'яти з 1720 до 1600 хв (тобто у 1,08 раза), а збільшення температури з 40 °С до 50 °С приводить до зменшення тривалості сушіння з 1900 до 1720 хв (у 1,1 раза). Швидкість сушіння стебел м'яти в початковий момент за температури сушильного агента 50 °С у 1,86 раза вища, ніж за 30 °С (рис 3б).

Кінетика процесу сушіння листків та стебел м'яти в одиничному шарі описувалася на базі дослідних кривих сушіння як залежність безрозмірного вологовмісту u^* від часу:

$$u^* = \frac{u - u_p}{u_n - u_p} = f(\tau), \quad (8)$$

де u – поточний вологовміст, кг/кг с.м.; u_n – початковий вологовміст, кг/кг с.м.; u_p – рівноважний вологовміст, який визначається з умов гігротермічної рівноваги за ізотермами адсорбції (рис. 1), кг/кг с.м.; τ – час сушіння, хв.

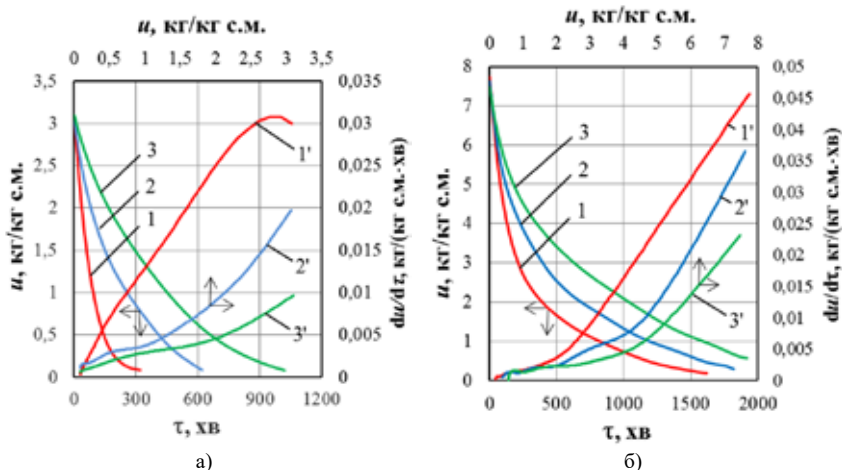


Рис. 3. Вплив температури сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння листків (а) та стебел (б) м'яти перцевої.
Режимні параметри: 1, 1' – $t = 50$ °С; 2, 2' – $t = 40$ °С; 3, 3' – $t = 30$ °С;
 $v = 1$ м/с; $d = 14$ г/кг с.п., висота шару 1 см

Для визначення часу зневоднення та узагальнення кривих сушіння використовується рівняння сушіння тонкого шару⁴³. Оскільки експериментальні криві сушіння м'яти перцевої (рис. 3) не дають помітно виражених періодів постійної та лінійно спадаючої швидкості сушіння, то для апроксимації експериментальних кривих сушіння окремо листя та стебел м'яти перцевої використовувалася експоненціальна залежність, що враховує складний хід кривої швидкості сушіння і застосовується для колоїдних капілярно-пористих матеріалів рослинного походження (модель Page)⁴⁴:

$$u^* = e^{-k\tau^n}, \tag{9}$$

де k – коефіцієнт сушіння; n – дослідна константа.
Величини коефіцієнтів рівнянь апроксимації кривих сушіння м'яти перцевої, що визначені за різних температур сушильного агента, наведені в таблиці 2. Для апроксимації експериментальних кривих використовувався пакет Origin. Адекватність рівнянь визначена з використанням нелінійного коефіцієнта регресії (R^2) і середньоквадратичної погрішності (S).

Порівняння експериментальних кривих кінетики сушіння одиничного шару листків (рис. 4а) та стебел (рис. 4б) м'яти перцевої з кривими, розрахованими за апроксимуючими рівняннями (табл. 2), показало задовільне співпадіння розрахункових даних з експериментальними.

Таблиця 2
Величини коефіцієнтів рівняння апроксимації (9) кривих сушіння

	Коефіцієнти	Температура, °C	R ²	S
М'ята перцева (листя)	$k = 0,00785; n = 1,1122$	50	0,9997	0,00003
	$k = 0,0264; n = 0,8836$	40	0,9989	0,00008
	$k = 0,0145; n = 0,8836$	30	0,9865	0,00089
М'ята перцева (стебла)	$k = 0,0630; n = 0,8836$	50	0,9995	0,00003
	$k = 0,0321; n = 0,9489$	40	0,9996	0,00003
	$k = 0,0334; n = 0,8068$	30	0,9998	0,00001

⁴³ Asrate D. A., Ali A. N. Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5. No. 1. Article 100927. DOI: 10.1016/j.afres.2025.100927.
⁴⁴ Ertekin C., Firat M. Z. A Comprehensive review of thin layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. Vol 57. No. 4. P. 701–717. DOI: 10.1080/10408398.2014.910493.

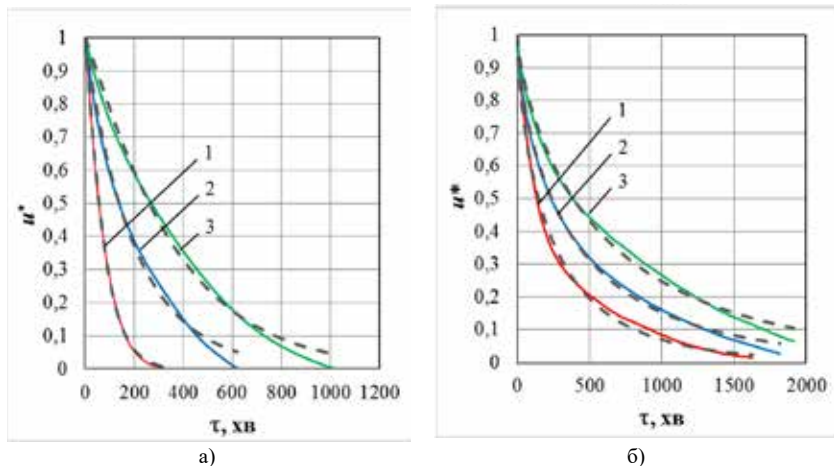


Рис. 4. Порівняння експериментальних кривих сушіння (суцільна лінія) одиничного шару листя (а) та стебел (б) м'яти перцевої з кривими, розрахованими за апроксимуючим рівнянням (9)

Відповідно до рівняння (9) тривалість процесу сушіння визначається як:

$$\tau = \left(\frac{1}{k} \ln \left(\frac{u - u_p}{u_n - u_p} \right) \right)^{1/n}. \quad (10)$$

Запропонований напівемпіричний метод розрахунку кінетики сушіння є досить точним, тому що встановлена залежність для тривалості процесу сушіння (10) від вологовмісту матеріалу, що одержана безпосередньо з експериментальних кривих сушіння, враховує всі фактори, що пов'язані з властивостями м'яти перцевої як об'єкта сушіння і особливостями процесу конвективного зневоднення. Розбіжність результатів розрахунку за одержаною формулою з експериментальними даними не перевищує 15%.

Проте на практиці під час заготівлі листя м'яти перцевої підготовлені цілі рослини (стебла з листками) збирають у пучки або подрібнюють на шматки по 7–10 см, підвішують або розкладають на рівній поверхні тонким шаром і висушують за низької температури повітря. Стебла м'яти з листками мають початковий вологовміст і тривалість зневоднення в шарі 2–2,5 см (рис. 5, крива 2) майже такі, як у стебел. Після сушіння стебла відокремлюють від листя в уже висушеному вигляді.

Слід зазначити, що 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 атмосферного повітря в Україні показав, що вологовміст повітря коливається в діапазоні від 8 г/кг с.п. до 20 г/кг с.п. Експериментально встановлено, що під час сушіння м'яти перцевої (стебла з листками) за температури сушильного агента 40 °С (рис. 5) підвищення вологовмісту сушильного агента з 6 г/кг с.п. до 13 г/кг с.п. приводить до збільшення часу сушіння до вологовмісту 0,10 кг/кг с.м. в 1,35 раза, а швидкість сушіння зменшується в 1,3 раза.

Зниження інтенсивності вологовидалення пов'язане зі зменшенням рушійної сили масообміну Δp , яка визначається різницею парціальних тисків пари води на поверхні матеріалу p_n і в парогазовому потокові $p_{с.а.}$ (рис. 1б). Так, у разі вологовмісту повітря 6 г/кг с.п. парціальний тиск водяної пари становить 8 мм рт.ст., а у разі 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-зв'язаної води – на 40%.

Аналіз експериментальних даних показав, що сушіння м'яти перцевої – довготривалий процес, здійснення якого в наявних конвективних

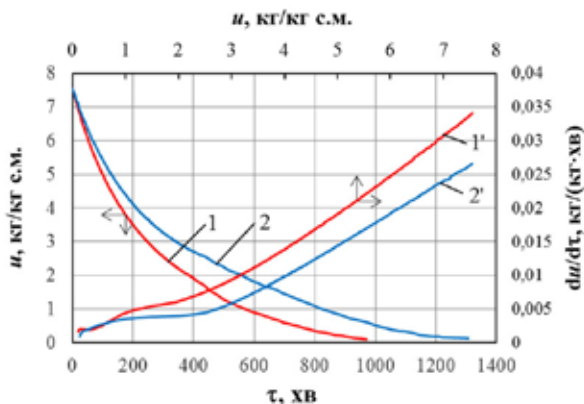


Рис. 5. Вплив вологовмісту сушильного агента на кінетику та швидкість сушіння м'яти перцевої (стебла з листками).
Режимні параметри: 1, 1' – $d = 6$ г/кг с.п.; 2, 2' – $d = 13$ г/кг с.п.;
 $t = 40$ °С, $v = 2$ м/с, висота шару 2–2,5 см

сушарках є не вигідним через їхню низьку енергоефективність (0,4...0,6), що пов'язана зі значними втратами теплоти з відпрацьованим повітрям (більше 20% у загальному тепловому балансі).

Традиційні методи інтенсифікації процесу сушіння шляхом підвищення температури і швидкості сушильного агента мають обмеження під час зневоднення ефіроносних рослин через термочутливість ефірних олій. Так, підвищення температури сушіння з 40 °C до 50 °C зменшує вміст ефірних олій у висушеній м'яті перцевої на 25%, а збільшення швидкості сушильного агента з 1 м/с до 2 м/с – на 15%⁴⁵. Тому для збереження цінних речовин оптимальні режими сушіння м'яті перцевої повинні реалізовуватись у процесі низькотемпературного зневоднення за температури, що не перевищує 40 °C, і швидкості сушіння 1 м/с.

Також у випадку сушіння ефіроолійної сировини неможливо використовувати такий метод інтенсифікації зневоднення термолабільних матеріалів, як ступеневі режими зі змінюваною температурою сушильного агента. Цей метод широко використовується у разі сушіння паренхімних тканин плодів і дозволяє знизити енерговитрати на (20...25)%⁴⁶. Проте, незважаючи на значну інтенсифікацію процесу сушіння у разі $t = 50$ °C (рис. 3), неможливо використати цю температуру для ступеневого режиму сушіння м'яті перцевої. Це пов'язано з тим, що цінні ефірні олії знаходяться у залозах-трихомах на поверхні листа і, як було встановлено (рис. 2б), у разі $t = 42,5$ °C відбувається інтенсивне виділення летких речовин з рослини.

Єдиним шляхом інтенсифікації процесу низькотемпературного сушіння є збільшення масообмінного напору Δp шляхом примусового осушення сушильного агента. Для підтримки необхідної величини масообмінного напору сушіння м'яті перцевої доцільно проводити за режимами зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента. На першій стадії сушіння, коли з матеріалу видаляється вільна волога, достатній невеликий ступінь осушення. На другій стадії (область гігроскопічного стану) ступінь осушення збільшується. На стадії досушування у разі видалення з м'яті перцевої адсорбційно-зв'язаної вологи, основним фактором, що зумовлює енерговитрати, є тривалість процесу. Для збільшення швидкості сушіння необхідно максимально збільшити ступінь осушення сушильного агента. Розроблені режими

⁴⁵ Sniezhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. T. 43. No. 4. С. 7–16. DOI: 10.31472/tpe.4.2021.1.

⁴⁶ Гусарова О. В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Київ : ІТТФ НАН України, 2020. 241 с.

забезпечують оптимальні інтенсивність масообміну та енерговитрати впродовж усього процесу сушіння (табл. 3).

Таблиця 3

Режими сушіння м'яти за температури сушильного агента 40 °С

Стадія	Ступінь осушення сушильного агента	d , г/кг с.п.	Δp , мм рт.ст.
I	невеликий ступінь осушення	20...25	28...23
II	збільшення ступеня осушення	14...20	24...28
III	максимально можливий ступінь осушення	6...14	22...24

У разі вибору методів зневоднення м'яти перцевої та сушильного обладнання необхідно керуватися такими вимогами:

1. Температура сушіння не повинна перевищувати гранично допустиму температуру нагріву м'яти перцевої, що становить 40 °С.
2. Сушіння повинно відбуватися в замкненому контурі для створення заданих умов процесу зневоднення, що не залежать від тепловологісних параметрів атмосферного повітря.
3. Повинна існувати можливість регулювання вологовмісту сушильного агента для реалізації режимів зі змінюваним ступенем його осушення.
4. Необхідно забезпечити збір випаруваної вологи для уловлювання летких речовин.
5. Для підвищення енергоефективності процесу сушіння необхідно забезпечити утилізацію теплоти відпрацьованого сушильного агента.

4. Розроблення та створення теплонасосної сушарки

Для підвищення енергоефективності процесу зневоднення м'яти перцевої запропоновано використовувати конденсаційний метод сушіння із застосуванням теплового насоса. Інтеграція теплового насоса в цикл конвективної сушарки дозволяє реалізувати висунуті за результатами експериментальних досліджень вимоги до проведення процесу сушіння м'яти перцевої. Можливість примусового осушення повітря у випарнику теплового насоса дозволяє створити необхідні тепловологісні параметри сушильного агента незалежно від умов навколишнього середовища (стану атмосферного повітря). Така здатність теплового насоса знижувати вологовміст сушильного агента під час низькотемпературного сушіння сприяє інтенсифікації вологовидалення за рахунок підвищення масообмінного напору між теплоносієм і матеріалом. Волога, що вилучається з матеріалу, не виноситься сушильним агентом в навколишнє

середовище, а конденсується на холодній поверхні випарника теплового насоса, при цьому утилізується теплота конденсації, яка повертається на більш високому рівні в процес. Це дозволяє знизити енерговитрати для конвективного сушіння, підвищивши його енергоефективність⁴⁷.

У праці⁴⁸ визначені енерговитрати для звичайної конвективної і для теплонасосної сушарки за однакових режимів сушіння. Порівняння отриманих питомих енерговитрат показало, що питомі енерговитрати у разі теплонасосного сушіння (2000 кДж/кг) у 2,7 раза менші, ніж у разі конвективного (5500 кДж/кг).

Під час теплонасосного сушіння в замкненому контурі можна реалізувати складний алгоритм управління процесом зневоднення. 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 тепlopідведення, так і ступінь осушування сушильного агента.

Для підвищення ефективності роботи сушильного обладнання запропоновано низку технічних рішень та розроблена удосконалена схема теплонасосної сушарки.

Слід зазначити, що в процесі теплонасосного сушіння в конденсаторі теплового насоса виділяється теплоти більше ніж необхідно для зневоднення матеріалу. Тому частину теплоти конденсації необхідно відводити за межі сушильної камери за допомогою зовнішнього конденсатора, який працює послідовно з внутрішнім конденсатором. 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 можна здійснювати таким чином: теплоносій, що виходить із сушарки, розділяється на два потоки, один з яких надходить до випарника теплового насоса, де охолоджується та осушується, після чого змішується з частиною рециркулюючого теплоносія та подається на нагрівання до конденсатора теплового насоса і далі – до сушильної камери. Під час сушіння ефіроолійної сировини до сушильної камери повертаються і випарені леткі речовини, що дає

⁴⁷ Snizhkin Y., Jian X., Chalaev D., Ulanov M., Dabizha N. Energy saving technologies for drying of heat-sensitive materials. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2019. Vol. 41. No. 4. P. 5–12. DOI: 10.31472/ttpe.4.2019.1.

⁴⁸ Snizhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. T. 43. No. 4. C. 7–16. DOI: 10.31472/ttpe.4.2021.1.

можливість регулювати парціальний тиск летких речовин у 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.

Як показали дослідження⁴⁹, під час роботи теплонасосного агрегата за схемою з осушенням частини теплоносія і рекуперацією «холоду» можна в 1,5–2 рази зменшити енерговитрати на процес сушіння. Для реалізації такої схеми необхідно встановити перед випарником теплового насоса рекуперативний теплообмінник «повітря-повітря».

На рис. 6 наведена удосконалена схема конвективної сушарки з тепловим насосом. Робота сушарки (рис. 6а) здійснюється таким чином. Нагріте у конденсаторі 3 теплового насоса сухе повітря (точка *a* процесу зневоднення в *H-d* діаграмі вологого повітря, рис. 6б) надходить до сушильної камери 1, де обдуває візок із продуктом і, відбираючи вологу від продукту, адіабатично зволожується (процес *a-b*). Після цього зволожене повітря розділяється на два потоки, один із яких повертається на рециркуляцію, а другий подається в тепловий насос на осушення. Осушуване повітря спочатку частково охолоджується в рекуперативному теплообміннику «повітря-повітря» 8 (процес *b-b'*), після чого доохолоджується у випарнику 5 теплового насоса (процес *b'-c-d*). При цьому частина вологи, що міститься в повітрі, конденсується, і вода виводиться з об'єму сушильної камери. Після проходження через випарник 5 охолоджене й осушене повітря підігрівається в рекуператорі 8 (процес *d-d'*) і змішується з вологим рециркулюючим повітрям (процеси *d'-e* і *b-e*). Змішане повітря (точка *e*) підігрівається в конденсаторі 3 (процес *e-a*), і цикл повторюється. Для забезпечення постійної температури сушіння надлишок тепла за допомогою додаткового зовнішнього конденсатора 7 відводиться в навколишнє середовище.

За результатами досліджень розроблена та створена теплонасосна сушильна установка камерного типу (рис. 7). Сушарка являє собою шафу, у верхній частині корпусу 1 якої знаходиться сушильна камера 2 з піддонами 4 для зневоднювального матеріалу, а в нижній – агрегатний відсік 3, де розташований теплонасосний агрегат 6. Теплонасосний агрегат включає холодильний компресор, випарник із системою відводу конденсату до конденсатозбірника і двосекційні повітряні конденсатори (внутрішній та зовнішній). Перед випарником холодильного агрегату встановлено

⁴⁹ Snezhkin Y., Chalaev D., Dabizha N. Analysis of energy performance of heat pump drying. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. Vol. 39. No. 3. P. 47–52. DOI: 10.31472/ithe.3.2017.07.

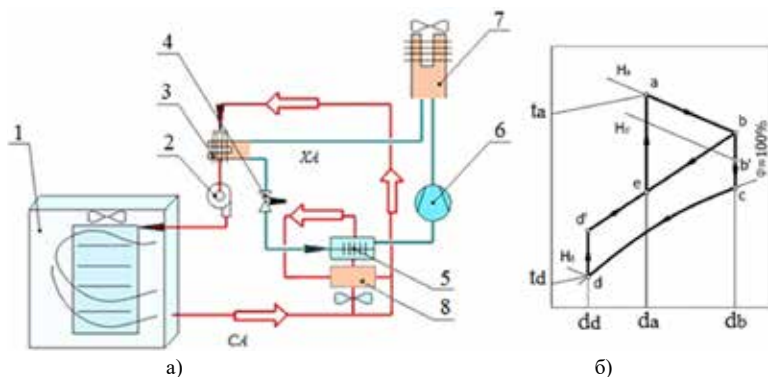


Рис. 6. Схема теплонасосної сушарки (а) та процес зневоднення в $H-d$ діаграмі вологого повітря (б): 1 – сушильна камера; 2 – вентилятор; 3 – внутрішній конденсатор; 4 – дросель; 5 – випарник; 6 – компресор; 7 – зовнішній конденсатор; 8 – рекупераційний теплообмінник; СА – контур сушильного агента; ХА – контур холодоагента



Технічні характеристики:	
Температура сушильного агента	40°–55 °С
Кількість вологи що видаляється з продукту	до 2 л/год
Кількість висушуваного продукту	до 40 кг/доба
Установлення електрична потужність	1,0 кВт
Питомі витрати електроенергії на випаровування вологи	0,3...0,7 кВт год/л

Рис. 7. Теплонасосна сушильна установка: 1 – корпус сушарки; 2 – сушильна камера (технологічний відсік); 3 – агрегатний відсік; 4 – піддон; 5 – пульт керування сушарки; 6 – теплонасосний агрегат; 7 – рекупераційний теплообмінник; 8 – циркуляційні вентилятори; 9, 10 – стартовий електронагрівач

рекуперативний теплообмінник 7. Тепловологісні параметри сушильного агента у сушарці задаються за допомогою приладу «Вимірювач-регулятор МТ2» на пульті керування 5. Підтримка заданих параметрів здійснюється за допомогою системи автоматики шляхом регулювання подачі холодоагенту у випарник і перерозподілу у необхідному співвідношенні величини теплового навантаження на секції конденсатора.

ВИСНОВКИ

Проведені комплексні дослідження, що спрямовані на всебічне вивчення властивостей м'яти перцевої як об'єкта сушіння та визначення оптимальних параметрів зневоднення, що забезпечують максимальне збереження ефірних олій, дозволили одержати такі результати.

За експериментальними дослідженнями з гігротермічної рівноваги за температури 30 °С у діапазоні відносних тисків p/p_s від 0,4 до 0,9 методом характеристичних кривих одержанні ізотерми сорбції пари води м'ятою перцевою за температур від 30 до 50 °С, що дозволило визначити величину чистої ізостеричної теплоти адсорбції та тепловологісні параметри сушильного агента у разі досушування м'яти до залишкового вологовмісту 10%.

Експериментально калориметричним методом одержані питомі витрати теплоти на сушіння листя м'яти за температур 40 і 50 °С. Виявлено вплив летких речовин ефірної олії м'яти перцевої на теплоту випаровування.

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

На підставі ізотерм сорбції для гігроскопічної області одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні м'яти перцевої від вологовмісту і температури в діапазоні $u = 0,07...0,29$ кг/кг с.м. і $t = 30...50$ °С, що дозволило визначити масообмінний напір Δp та обґрунтувати метод інтенсифікації процесу низькотемпературного сушіння шляхом примусового осушення сушильного агента.

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 з 13 г/кг с.п. до 6 г/кг с.п. дозволяє на 25% скоротити тривалість сушіння.

Для підтримки необхідної величини масообмінного напору запропоновано проводити сушіння м'яти перцевої за режимами зі змінюваним ступенем осушення сушильного агента з поступовим його зниженням до максимальної величини. Розроблені режими забезпечують оптимальні інтенсивність масообміну та енерговитрати впродовж усього процесу сушіння.

Запропоновано використовувати конденсаційний метод сушіння із застосуванням теплового насоса для підвищення енергоефективності процесу зневоднення м'яти перцевої та створена теплонасосна сушильна установка камерного типу. Питомі енерговитрати теплонасосної сушарки майже в 2,5 раза менші, ніж конвективної.

АНОТАЦІЯ

Зважаючи на високий світовий попит на лікарські й ефіроолійні рослини, особлива увага приділяється підвищенню ефективності та сталості процесів їх сушіння, яке є енерговитратним етапом переробки і водночас визначальним для збереження біологічно активних речовин та ефірних олій.

Однією з широко використовуваних лікарських ефіроолійних культур є м'ята перцева (*Mentha piperita* L.), яка володіє антимікробними, антиоксидантними, протівірусними, антибактеріальними, протизапальними, протигрибковими, протиастматичними, спазмолітичними, антисептичними властивостями тощо.

Мета дослідження полягає у вивченні кінетики процесу зневоднення м'яти перцевої, розробленні енергоефективних режимів сушіння, за яких забезпечуються мінімальні питомі витрати енергії та максимальне збереження ефірних олій, виборі та вдосконаленні сушильної установки.

Методологія дослідження ґрунтується на комплексному підході, спрямованому на всебічне вивчення властивостей м'яти перцевої як об'єкта сушіння, що включає дослідження сорбційних властивостей, визначення граничних температур нагріву та кінетики сушіння, встановлення оптимальних параметрів зневоднення, що забезпечують максимальне збереження ефірних олій, обґрунтування методу інтенсифікації та способу сушіння.

За результатами досліджень гігротермічної рівноваги для гігроскопічної області одержана залежність парціального тиску водяної пари на поверхні м'яти перцевої від вологовмісту і температури в діапазоні $u = 0,07...0,29$ кг/кг с.м. і $t = 30...50$ °C, що дозволило визначити масообмінний напір Δp та обґрунтувати метод інтенсифікації процесу

низькотемпературного сушіння шляхом примусового осушення сушильного агента.

Встановлено, що для запобігання значних втрат ефірних олій гранично допустима температура нагріву м'яти перцевої під час зневоднення не повинна перевищувати температуру плавлення ментолу 42,5 °С.

Результатами експериментальних досліджень кінетики сушіння м'яти перцевої встановлено, що зниження вологовмісту сушильного агента шляхом примусового осушення з 13 г/кг с.п. до 6 г/кг с.п. дозволяє на 25% скоротити тривалість сушіння.

Запропоновано використовувати конденсаційний метод сушіння із застосуванням теплового насоса для підвищення енергоефективності процесу зневоднення м'яти перцевої. Створена теплонасосна сушильна установка камерного типу, питомі енерговитрати якої майже в 2,5 рази менші, ніж конвективної.

Література

1. Sniezhkin Yu., Dabizha N., Malashchuk N. Energy resource saving technologies of dehydration of medicinal and aromatic plants. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2021. Т. 43. No. 4. С. 7–16. DOI: 10.31472/ttpe.4.2021.1.
2. Товарознавство та інноваційні технології переробки лікарсько-технічної рослинної сировини : навчальний посібник / Павлюк Р. Ю. та ін. Харків : 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. Vol. 4. No. 4. P. 312–319.
4. Nakra S., Tripathy S., Srivastav P. P. Drying as a preservation strategy for medicinal plants: Physicochemical and functional outcomes for food and human health. *Phytomedicine Plus*. 2025. Vol. 5. No. 2. Article 100762. DOI: 10.1016/j.phyplu.2025.100762.
5. 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. Vol. 61. No. 11. P. 1763–1786. DOI: 10.1080/10408398.2020.1765309.
6. Sniezhkin Yu. Energy-efficient dryers developed at the Institute of engineering thermophysics of NAS of Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2025. Vol. 50. No. 4. P. 5–17. DOI: 10.31472/ttpe.4.2025.1.

7. Nurhaslina C. R., Bacho S. A., Mustapa A. N. Review on drying methods for herbal plants. *Materials Today* : Proceedings. 2022. Vol. 63. P. S122–S139. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.052.
8. Eapen A. S., Bhosale Y. K., Roy S. A review on novel techniques used for drying medicinal plants and its applications. *International Journal of Biomaterials*. 2025. Article ID 4533070. 21 p. DOI: 10.1155/ijbm/4533070.
9. FAOSTAT. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL> (дата звернення: 23.02.2026).
10. Nayak P., Kumar T., Gupta A. K., Joshi N. U. Peppermint a medicinal herb and treasure of health. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 1519–1528. DOI: 10.22271/phyto.2020.v9.i3y.11525.
11. Ковальов В. М., Павлій О. І., Ісакова Т. І. Фармакогнозія з основами біохімії рослин. Харків : Прапор НФАУ, 2000. 704 с.
12. Мінарченко В. М., Бутко А. Ю. Дослідження вітчизняного ринку лікарських засобів рослинного походження. *Фармацевтичний журнал*. 2017. № 1. С. 30–36. DOI: 0.32352/0367-3057.1.17.04.
13. European Pharmacopoeia. 8th edition (Ph. Eur. 8). Strasbourg : Council of Europe, 2014. P. 275–276, 1232–1234, 1350–1352, 1369–1370.
14. 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. Vol. 569. P. 95–98.
15. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Ільєнко О. О., Ловецько В. О. Сушіння м'яти на конвективних сушильних установках. *Харчова промисловість*. 2010. Вип. 9. С. 168–170.
16. 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. Vol. 20. No. 4. P. 1131–1136. DOI: 10.1080/0972060X.2017.1371647.
17. Дабіжа Н. О. Інтенсифікація процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Київ : ІТТФ НАН України, 2013. 208 с.
18. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування води і органічних рідин з матеріалів: пат. 84075 Україна: МПК G 01N 25/26, G 01N 25/28. № а200613266; заявл. 15.12.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17. 10 с.
19. Гусарова О. В. Інтенсифікація тепломасопереносу під час одержання чипсів з яблук : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. Київ : ІТТФ НАН України, 2020. 241 с.
20. Снежкін Ю. Ф., Дабіжа Н. О. Дослідження адсорбційних характеристик колоїдних капілярно-пористих матеріалів з метою

визначення режимів сушіння. *Промислова теплотехніка*. 2000. Т. 22. № 3. С. 26–29.

21. Загоруйко В. А., Голиков О. А., Слинько О. Г. Термодинаміка та теплофізика вологих матеріалів. Київ : Наукова думка, 1995. 296 с.

22. Quirijns E. J., van Boxtel A. J., van Loon W. K., van Straten G. Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2005. Vol. 85. P. 1805–1814. DOI: 10.1002/jsfa.2140.

23. Sniezhkin Yu., Dabizha N., Dmytrenko N., Malashchuk N. (2023). Sorption and thermodynamic properties of aromatic plants as drying objects. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2023. Т. 45. No. 2. С. 5–14. DOI: 10.31472/ttpe.2.2023.1.

24. Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, surface area and porosity. London; New York : Academic Press, 1982. 306 p.

25. Al-Muhtaseb A. H., McMinn W. A. M., Magee T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Trans IChemE*. 2002. Vol. 80. Part C. P. 118–128. DOI: 10.1205/09603080252938753.

26. Chickos J. S., Garin D. L., Hitt M., Schilling G. Some solid state properties of enantiomers and their racemates. *Tetrahedron*. 1981. Vol. 37. P. 2255–2259. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)97981-5.

27. 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. No. 1–2. P. 161–172. DOI: 10.1016/j.chroma.2005.06.006.

28. 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. Vol. 198. No. 1. P. 111–121. DOI: 10.1016/S0378-3812(01)00759-2.

29. Dmytrenko N. V., Malashchuk N. S., Dabizha N. O., Ivanov S. O. Influence of drying temperature on removal of volatile aromatic compounds from mint leaves. *Scientific forum: theory and practice of research : II International Scientific and Theoretical Conference, Valencia, Spain, 2022*. DOI: 10.36074/scientia-16.09.2022.

30. Asrate D. A., Ali A. N. Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5. No. 1. Article 100927. DOI: 10.1016/j.afres.2025.100927.

31. Ertekin C., Firat M. Z. A Comprehensive review of thin layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. Vol 57. No. 4. P. 701–717. DOI: 10.1080/10408398.2014.910493.

32. Sniezhkin Y., Jian X., Chalaev D., Ulanov M., Dabizha N. Energy saving technologies for drying of heat-sensitive materials. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2019. Vol. 41. No. 4. P. 5–12. DOI: 10.31472/ttpe.4.2019.1.

33. Snezhkin Y., Chalaev D., Dabizha N. Analysis of energy performance of heat pump drying. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. Vol. 39. No. 3. P. 47–52. DOI: 10.31472/ihe.3.2017.07.

Information about the authors:

Dabizha Nataliia Oleksandrivna,

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher at the Department of Heat
and Mass Transfer in Heat Technologies
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
2-a, Marii Kapnist Street, Kyiv, Ukraine

Dmytrenko Nataliia Vitaliyivna,

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher at the Department of Heat
and Mass Transfer in Heat Technologies
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
2-a, Marii Kapnist Street, Kyiv, Ukraine

Malashchuk Nataliia Savivna,

Doctor of Philosophy,
Senior Researcher at the Department of Heat
and Mass Transfer in Heat Technologies
Institute of Engineering Thermophysics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
2-a, Marii Kapnist Street, Kyiv, Ukraine