

УДК 664.8.047.014

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ТЕМНО-ЗЕЛЕНИХ ЛИСТОВИХ ОВОЧІВ

Петрова Ж.О.¹, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Коваль І.О.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, Україна, 03057, професор, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, Україна, 03057, koval.igor@olegovich@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0006-5916-6912><https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.3>

У статті досліджено кінетику сушіння шпинату (*Spinacia oleracea* L.), щавлю (*Rumex acetosa* L.) та шпинатно-щавлевої суміші. Визначено, що для зневоднення листових овочів доцільно застосовувати невисокі температури сушіння, для збереження якісних характеристик матеріалу.

The article investigates the kinetics of drying spinach (*Spinacia oleracea* L.), sorrel (*Rumex acetosa* L.) and a mixture of spinach and sorrel. It has been determined that low drying temperatures are preferable for dehydrating leafy vegetables in order to preserve the quality characteristics of the material.

Бібл. 36, рис. 8.

Ключові слова: конвективне сушіння, фолати, шпинат, щавель.

u – вологовміст, кг вол./кг сух.речов.;

 τ – час, хв;

V – швидкість теплоносія, м/с;

t – температура теплоносія, °C;

 δ – товщина шару, мм.**Вступ**

Постановка проблеми. Харчування відіграє життєво важливу роль у здоров'ї людини. Наприклад, дефіцит вітамінів або надмірне їх споживання може збільшити ризик різних проблем зі здоров'ям [1].

Фолати мають вирішальне значення для життя, як компонент і каталізатор важливих біохімічних реакцій, зокрема, і особливо завдяки своїй центральній ролі в метаболізмі нуклеотидів для синтезу ДНК та процесах метилювання [2, 3].

Фолат – це водорозчинний вітамін групи В, який відіграє життєво важливу роль у рості та розвитку клітин [1, 4]. Фолат включає ендogenous харчовий фолат та його синтетичну форму, фолієву кислоту [5]. У своїй природній формі фолат нестабільний при зберіганні та приготуванні їжі [6]. При цьому фолієва кислота стабільна [6 - 8] та використовується як добавка та для збагачення їжі.

Назви фолієвої кислоти або фолату походять від латинського слова *folium*, що означає «лист» [9]. Вперше його було виділено з листя шпинату в 1941 році [10].

Фолієва кислота – це форма фолату, яка природним чином присутня у високих концентраціях у листових овочах, таких як овочі (шпинат, салат, капуста, броколі,

авокадо, спаржа, бамія, томати, цибуля-порей, черемша), фруктах (банан, диня, лимони, полуниця, апельсини), бобові (квасоля, горох, сочевиця), горіхах, дріжджах, грибах та тваринних продуктах (м'ясо, печінка (теляча, яловича), птиця, яйця, молоко та молочні продукти) [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шпинат (*Spinacia oleracea* L.) — однорічна листова зелена рослина, яка в основному походить з центральної частини Азії та Ірану [12]. Шпинат (*Spinacia oleracea* L.) належить до ряду гвоздикових (*Caryophyllales*) родини амарантових (*Amaranthaceae*), є низькокалорійним продуктом, багатим на поживні речовини, корисні для організму людини [13]. Листя шпинату багате на бета-каротин (провітамін А), фолієву кислоту (вітаміни А, С), мінеральні речовини (фосфор, натрій і калій) та харчові волокна, воно також визнане цінним харчовим джерелом антиоксидантів, маючи надзвичайно високу ORAC (здатність поглинати кисневі радикали) [14-16].

Шпинат – це овоч, який швидко псується після збору врожаю та споживається лише в сезон вирощування. Його продають розсипом, зв'язаним у пучки, упакованим у свіжому вигляді в пакети, консервованим або замороженим [17].

Сушіння – це один із методів зберігання, який дозволяє продовжити термін споживання шпинату, зберігаючи при цьому вміст вітамінів та запобігаючи росту та виробленню мікроорганізмів, що спричиняють гниття [17 - 19].

У роботі [20] зразки шпинату були висушені за допомогою конвективної сушарки шафового типу. Експерименти з сушіння проводили з використанням постійної швидкості повітря 1,2 м/с та чотирьох температур теплоносія: 50, 60, 70 та 80°C. Зразок вагою $100 \pm 0,1$ г розподіляли на лотку до товщини 1,4 см. Швидкість сушіння збільшувалася зі збільшенням температури повітря, що призводило до скорочення часу сушіння. Але при дослідженнях не було враховано якісні властивості матеріалу які погіршуються при сушінні при високих температурах.

У іншій роботі [21] досліджували сушіння листя шпинату в комбінованій конвекційно- мікрохвильовій сушарці. Листя шпинату сушили за допомогою мікрохвильової сушарки, комбінації мікрохвильової сушарки та конвекції, а також конвекційним методом. Було досліджено вплив мікрохвильового сушіння (180, 360, 540, 720 та 900Вт); конвекції (100, 180, 230 °C); комбінованої конвекції (100, 180, 230 °C) та мікрохвильової сушарки (180 та 540 Вт) на час сушіння, коефіцієнт сушіння та зміну кольору листя шпинату. Перед сушінням листя шпинату відокремлювали від стебел. Висока потужність та температура мікрохвильової сушарки призвели до скорочення часу сушіння. Швидкість сушіння значно зростала зі збільшенням вихідної потужності та температури мікрохвильової сушарки. Сушіння вентилятором мало впливало на колір листя шпинату порівняно з сушінням у мікрохвильовій сушарки та сушінням у мікрохвильовій сушарці з конвекцією. Застосування температури сушіння 230°C під час сушіння вентилятором збільшило швидкість погіршення кольору.

Авторами [22] проведені дослідження сублімаційного та розпилювального сушіння шпинату. Зі свіжого листя шпинату вичавили сік, після його центрифугували протягом 15 хвилин при 4 °C. Супернатант (шпинатний сік, вміст сухої речовини $4,75\% \pm 0,014\%$ (сухої речовини)) концентрували за допомогою роторного випарника для отримання концентрованого шпинатного соку (КСС, $7,44\% \pm 0,23$ ДС). Спочатку готували білково-шпинатні комплекси шляхом змішування концентрату шпинатного соку та ізолятом сироваткового білка або ізолятом соєвого

білка. Розчини перемішували протягом 30 хвилин для полегшення зв'язування фітохімічних речовин шпинату з білком. Сушіння розпилювальним способом проводили за допомогою розпилювальної сушарки В-290 (Buchi Labortechnik AG, Швейцарія) у прямому потоці, з насадкою 1,5 мм, швидкістю потоку сировини 10 мл/хв (контрольованим перистальтичним насосом), а також за температури вхідного повітря для сушіння 140 °C (визначено в попередніх експериментах, дані не показані) та температури на виході 75–77 °C. Результати показали, що розпилювальне сушіння, що застосовується до концентрованого шпинатного соку, комплексованого чи ні з білком, забезпечує краще надходження як ліпофільних (каротиноїдів та хлорофілів), так і гідрофільних флавоноїдних фітохімічних речовин до товстої кишки порівняно з сублімаційним сушінням. Ізолят сироваткового білка полегшив біодоступність ліпофільних сполук шпинату, досліджених у цьому дослідженні. Загалом, результати показують, що інкапсуляція концентрованого шпинатного соку з білком може бути адаптована для отримання сухих продуктів зі збереженими біоактивними сполуками та покращеною біодоступністю.

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблені технології переробки фітоестрогенної [23] та фолатовмісної сировини на основі шпинату [24]. В роботі [23] описано попередню гіротермічної підготовки сировини до сушіння, що дозволяє інактивувати антихарчові компоненти в соєвих бобах. Проведені подальші експериментальні дослідження по сушінню соєво-шпинатної композиції при температурах теплоносія 60 °C та ступеневій зміні температури теплоносія 100/60 °C показали, що тривалість сушіння матеріалу в режимі теплоносія 100/60 °C зменшується на 25% в порівнянні з тривалістю процесу при 60 °C. Поєднання сої з шпинатом розширило температурний діапазон зміни кислотного числа в процесі сушіння.

Для стабілізації фолатів рослинну сировину потрібно поєднувати із сировиною, яка має високий вміст вітаміну С [24]. Тому у роботі [24] до шпинату додавали яблуко, яке має підвищений вміст вітаміну С, у співвідношенні 2:1 для стабілізації фолатів. На рис. 1 представлено вміст фолатів сирової, обробленої та висушеної після підготовки сировини, при створенні шпинатно-яблучної композиції. Обробка шпинату виконувалась наступним чином, йогомили та попередньо замочували у воді температурою 20 - 25°C протягом 5 хв. Гіротермічна обробка дозволяє також розчиняти нітрати у листових овочах.

Як видно з рисунку 1, якщо вміст фолатів вихідної сировини прийняти за 100% (1), то втрати під час підготовки сировини становлять лише 5% (2). Основні втрати відбуваються під час дії теплоносія на сировину. Створення композиції шпинату з яблуком (4) дає можливість на 20% зменшити втрати фолатів під час сушіння (5).

Сушіння попередньо підготовленої суміші шпинату та яблук здійснюють у дві стадії конвективним способом при температурі теплоносія 110 °С протягом 15-20 хв, після чого її знижують до температури 65°С і досушують до кінцевої вологості 6-8%. Це забезпечує збереження до 70 % фолатів за рахунок природних стабілізаторів [24].

Щавель кислий або звичайний (*Rumex acetosa L.*) – це багаторічна трав'яниста рослина родини Гречкових (*Polygonaceae*) [25, 26]. Ця рослина має пряний, кислий смак, схожий на смак лимона, її вживають сирого або додають до супів, рагу та солодощів [27]. Він має високий вміст аскорбінової кислоти та антиоксидантні

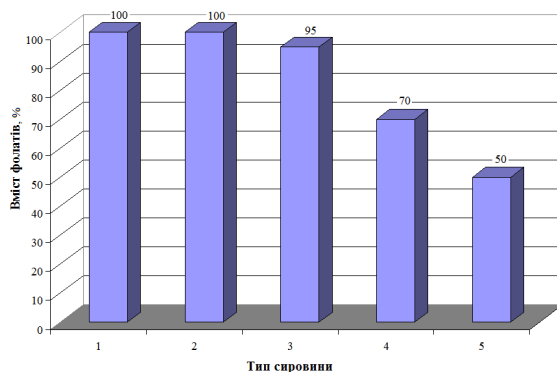


Рис. 1. Вміст фолатів в залежності від виду обробки та типу сировини: 1 – вихідна сировина шпинат; 2 – вихідна сировина шпинат-яблуко; 3 – гідротермічна обробка шпинату; 4 – сушіння шпинатно-яблучної композиції з гідротермічною обробкою шпинату; 5 – сушіння шпинату при температурі 60°С

Fig. 1. Folate content depending on the type of processing and raw material: 1 – raw spinach; 2 – raw spinach and apple; 3 – hygrothermal treatment of spinach; 4 – drying of spinach-apple composition with hygrothermal treatment of spinach; 5 – drying of spinach at a temperature of 60°C

властивості; багатий на мінерали, вітаміни та клітковину; а також має високий вміст білка в листі [28, 29]. Крім того, стверджується, що він містить усі незамінні амінокислоти та високий вміст біологічно активних сполук [30, 31].

Хлорофілвмісні овочі виділяються серед іншої рослинної сировини високим вмістом хлорофілу, β-каротину, аскорбінової кислоти, фенольних сполук та інших біологічно активних речовин, які мають імуномодельную та антиоксидантну дію [32].

Колір є однією з головних характеристик, що впливають на сенсорну якість овочів. Колір овочів, наприклад, шпинату, зумовлений наявністю різних пігментів, які в першу чергу є зеленими хлорофілами та жовтими, помаранчевими та червоними каротиноїдами. У зелених листових овочах, таких як шпинат, видно лише зелені хлорофіли, оскільки вони маскують яскраві кольори каротиноїдів [33].

Деградація або перетворення (або обох) зелених хлорофілів, феофорбіди, пірофеофітини та ірофеофорбіди) призводить до зміни кольору.

Враховуючи, що щавель має високий вміст вітаміну С, то його доцільно додавати до шпинату для стабілізації фолатів.

Тому **метою роботи** є дослідження процесів сушіння темно-зелені листові овочі сировини на основі шпинату та щавлю.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використовували шпинат та щавель. Обробка шпинату та щавлю виконувалась наступним чином, попередньо мили та замочували у воді за температури 20 – 25°С протягом 10 - 15 хвилин. Після чого нарізали, змішували у співвідношенні 2:1 шпинату та щавлю відповідно залишаючи на 10-15 хвилин для стабілізації. На рис. 2 представлений визначений вміст фолатів сирого, обробленого та висушеного після підготовки сировини.

Як видно застосування температури сушіння 55 °С шпинату дозволяє зменшити витрати фолатів на 10% порівняно з 60°С. Також створення шпинатно-щавлевої суміші (рис.2 (4)) дає можливість на 15% зменшити витрати фолатів під час сушіння (рис. 2 (5)).

Дослідження кінетики сушіння матеріалу проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації [34].

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100,$$

де m_1 – маса порожньої буюкси (з кришкою), г; m_2 – маса буюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса буюкси з наважкою після сушіння, г.

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг вол./кг с.р., то отримаємо вологовміст (питомий масовміст) матеріалу [35]:

$$u = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

Результати

Дослідження шпинату проводили за режимами сушіння 55 та 80°C, швидкість теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу $7 \pm 2\%$.

На рис. 3 показано зміни вологовмісту та температури в шарі шпинату. Як видно з рис. 3 найбільша тривалість сушіння при 55 °C та становить 190 хв. Найменша тривалість при 80 °C та становить 91 хв, але при цьому псується якість матеріалу, погіршується смак. Шпинат має високий вміст хлорофілу приблизно 120 до понад 500 мг на 100 г. Використання високих температур при сушінні, прискорює руйнування хлорофілу у

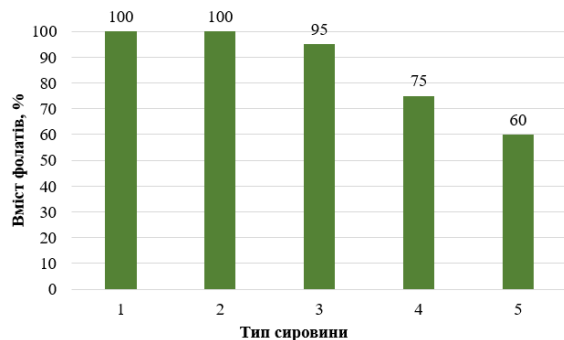


Рис. 2. Вміст фолатів в залежності від виду обробки та типу сировини: 1 – вихідна сировина шпинат; 2 – вихідна сировина шпинат-щавель; 3 – гідротермічна обробка шпинату; 4 – сушіння шпинатно-щавлевої суміші з гідротермічною обробкою;

5 – сушіння шпинату при температурі 55°C
 Fig. 2. Folate content depending on the type of processing and raw material: 1 – raw spinach; 2 – raw spinach and sorrel; 3 – hygrothermal treatment of spinach; 4 – drying of spinach-sorrel mixture with hygrothermal processing; 5 – drying of spinach at a temperature of 55°C

шпинаті, перетворюючи його у на першому етапі утворюються феофітини, на другому – пірофеофітини, що призводить до знебарвлення овочів [36]. Тому подальші дослідження проводили при температурі теплоносія 55 °C.

На рис. 4 представлено зміна швидкості сушіння шпинату в шарі. Як видно з рис. 4 найбільша максимальна швидкість сушіння за режимом 80 °C і становить 69,1%/хв, найменша за режимом 55°C – 45,4%/хв.

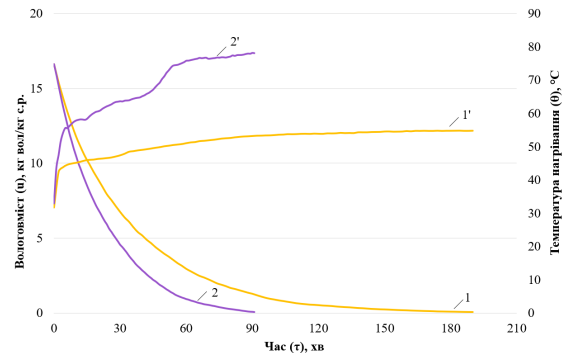


Рис. 3. Зміна вологовмісту (1, 2) та температури всередині шару (1', 2') шпинату в шарі за різних температур теплоносія ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с):

1 – 55 °C; 2 – 80 °C

Fig. 3. Change in moisture content (1, 2) and temperature inside the layer (1', 2') of spinach in the layer at different coolant temperatures ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s): 1 – 55 °C; 2 – 80 °C

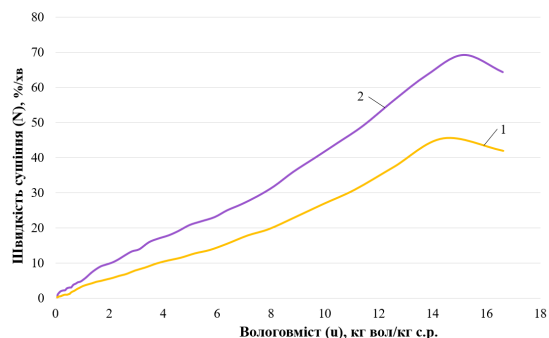


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння (1, 2) шпинату в шарі за різних температур теплоносія ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с):

1 – 55 °C; 2 – 80 °C

Fig. 4. Change in the drying rate (1, 2) of spinach in a layer at different coolant temperatures ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s): 1 – 55 °C; 2 – 80 °C

Далі були виконані дослідження сушіння щавлю та суміші на основі шпинату та щавлю за режимом сушіння 55 °С, швидкість теплоносія 3,0 м/с. Сушіння проводили до вологості матеріалу $7 \pm 2\%$.

На рис. 5 представлена кінетика сушіння щавлю в шарі. Як видно тривалість сушіння при 55 °С становить 182 хв (рис.5).

На рис. 7 представлена кінетика сушіння суміші шпинату та щавлю у співвідношенні 2:1 в шарі. Як видно тривалість сушіння при 55 °С становить 182,1 хв (рис.7).

На рис. 8 представлено зміна швидкості сушіння шпинату в шарі. Як видно з рис. 8 максимальна швидкість становить 54,6%/хв.

Висновки

У роботі виконані дослідження кінетики сушіння темно-зелених овочів таких як шпинат, щавель та їх

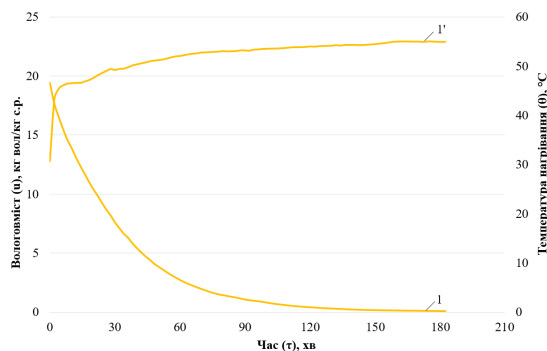


Рис. 5. Зміна вологовмісту (1) та температури всередині шару (1') щавелю в шарі ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с, $t=55$ °С)

Fig. 5. Change in moisture content (1) and temperature inside the layer (1') of sorrel in the layer ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s, $t=55$ °C)

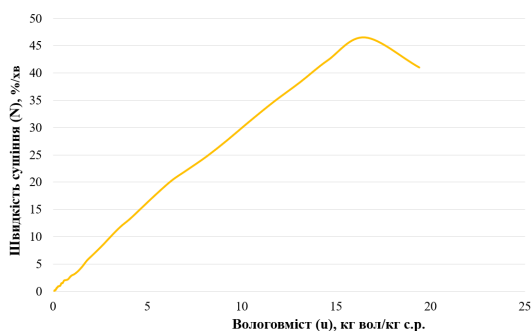


Рис. 6. Зміна швидкості сушіння щавелю в шарі ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с, $t=55$ °С)

Fig. 6. Change in the drying rate of sorrel in a layer ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s, $t=55$ °C)

суміші. Визначено, що тривалість сушіння даних листових овочів знаходиться в межах 180-190 хвилин при температурі теплоносія 55°С. Створення шпинатно-щавлевої суміші дозволяє зберегти фолати, які знаходяться у шпинаті. Використання високих температур при сушінні, прискорює руйнування хлорофілу та фолатів, тому доцільне застосування більш низьких параметрів теплоносія.

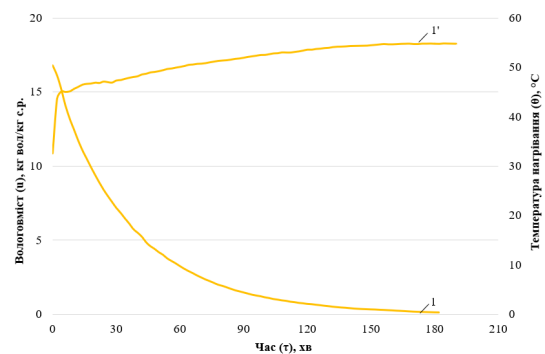


Рис. 7. Зміна вологовмісту (1) та температури всередині шару (1') шпинатно-щавлевої суміші в шарі ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с, $t=55$ °С)

Fig. 7. Change in moisture content (1) and temperature inside the layer (1') of the spinach-oxalate mixture in the layer ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s, $t=55$ °C)

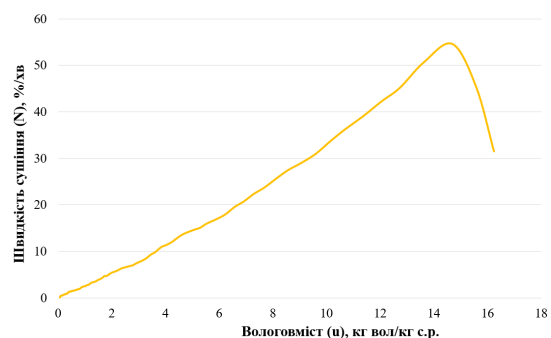


Рис. 8. Зміна швидкості сушіння шпинатно-щавлевої суміші в шарі ($\delta \approx 10$ мм, $V=3$ м/с, $t=55$ °С)

Fig. 8. Change in the drying rate of the spinach-oxalate mixture in a layer ($\delta \approx 10$ mm, $V=3$ m/s, $t=55$ °C)

ЛІТЕРАТУРА

1. *Gunnala S., Buhlman L. M., Jadavji N. M.* How Increased Dietary Folic Acid Intake Impacts Health Outcomes Through Changes in Inflammation, Angiogenesis, and Neurotoxicity. *Nutrients*, 2025, 17(7), 1286. <https://doi.org/10.3390/nu17071286>
2. *Menezo Y., Elder K., Clement A., Clement, P.* Folic Acid, Folinic Acid, 5 Methyl TetraHydroFolate Supplementation for Mutations That Affect Epigenesis through the Folate and One-Carbon Cycles. *Biomolecules*, 2022, 12(2), 197. <https://doi.org/10.3390/biom12020197>
3. *Duthie S. J., Narayanan S., Brand G. M., Pirie L., Grant G.* Impact of folate deficiency on DNA stability. *The Journal of nutrition*, 2002, 132(8), 2444S-2449S. <https://doi.org/10.1093/jn/132.8.2444S>
4. *Blatch S. A., Stabler S. P., Harrison J. F.* The effects of folate intake on DNA and single-carbon pathway metabolism in the fruit fly *Drosophila melanogaster* compared to mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 189, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2015.07.007>
5. *Crider K. S., Bailey L. B., Berry R. J.* Folic acid food fortification-its history, effect, concerns, and future directions. *Nutrients*, (2011). 3(3), 370–384. <https://doi.org/10.3390/nu3030370>
6. *Eitenmiller R.R., Landen Jr. W.O., Ye L.* Vitamin Analysis for the Health and Food Sciences (2nd ed.). CRC Press.: Boca Raton, 2007. 664 p. <https://doi.org/10.1201/9781420009750>
7. *O'Broin J.D., Temperley I.J., Brown J.P., Scott J.M.* Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic acid. *The American journal of clinical nutrition*, 1975, 28(5), 438–444. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.5.438>
8. *Temple C.T., Montgomery J.A.* Chemical and Physical Properties of Folic acid and Reduced Derivatives. In: Blackey R.L., Benkovic S.J., Eds., *Folates and Pterins*, Vol. 1, Chemistry and Biochemistry of Folates, 2nd Edition. John Wiley and Sons: New York, 1984. 61-120.
9. *Sharma N., Gaikwad A. B., Kulkarni Y. A.* Folic Acid in Pain: An Epigenetic Link. In *Nutritional Modulators of Pain in the Aging Population*. Academic Press, 2017. P. 245-251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805186-3.00021-7>
10. *Evans W. C., Evans D.* Vitamins and hormones. In *Trease and Evans' Pharmacognosy*. Elsevier: London, 2009, P. 451–458. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-2933-2.00031-9>
11. *Bansal M., Singh N., Pal S., Dev I., Ansari K. M.* Chemopreventive role of dietary phytochemicals in colorectal cancer. *Advances in molecular toxicology*, 2018, 12, 69-121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64199-1.00004-X>
12. *Hasnain M. S. U., Zafar A., Rukh M., Khan M. K., Sultani H. M. A., Ashraf M. J. B.* The botanical effects of selenium and zinc on biochemical attributes of spinach under varying salt conditions. *The Research of Medical Science Review*, 2025, 3(8), 331-338. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16809962>
13. *Balkrishnaa A., Gautama A. K., Sharmaa N., Aryaa V., Khelwadea V.* Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109-115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
14. *Morelock T.E., Correll J.C.* Spinach. In: *Prohens, J., Nuez, F. (eds) Vegetables I. Handbook of Plant Breeding*, vol 1. Springer: New York, 2008, 189–218. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_6
15. *Zhao X., Iwamoto T., Carey E. E.* Antioxidant capacity of leafy vegetables as affected by high tunnel environment, fertilisation and growth stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(14), 2692-2699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3032>
16. *Watanabe M., Ayugase J.* Effect of low temperature on flavonoids, oxygen radical absorbance capacity values and major components of winter sweet spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10), 2095-2104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6925>
17. *Simha P., Gugalia A.* Thin layer drying kinetics and modelling of *Spinacia oleracea* leaves. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, 8(9), 1053-1066.
18. *Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Гусарова О.В.* Інтенсивні способи сушіння яблучних слайсів з конвективним та комбінованим енергопідведенням. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2024, 46(4), 5-14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1>
19. *Inyang U., Oboh I., Etuk B.* Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45-72.
20. *Doymaz I.* Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(1), 112-125. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
21. *Karaaslan S. N., Tuncer I. K.* Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012>
22. *Grace M. H., Hoskin R. T., Hayes M., Iorizzo M., Kay C., Ferruzzi M. G., Lila M. A.* Spray-dried and freeze-dried protein-spinach particles; effect of drying technique and protein type on the bioaccessibility of carotenoids, chlorophylls, and phenolics. *Food chemistry*, 2022, 388, 133017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133017>

23. Петрова Ж., Слободянюк К. Розробка енергоефективного режиму сушіння фітоестрогенної рослинної сировини. *Scientific Works*, 2019, 83(1), 85-91. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1423>
24. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини. Київ: Наукова думка, 2018. 187с.
25. da Silva E. C., Carlos L. D. A., Araújo A. P., Ferraz L. D. C., Pedrosa M. W., Silva L. S. Characterization of two types of azedinha in the region of Sete Lagoas, Brazil. *Horticultura Brasileira*, 2013, 31, 328-331. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200025>
26. Ferreira Gomes B. A., de Barros H. E. A., Ntarelli C. V. L., Zitha E. Z. M., Carvalho E. E. N., de Barros Vilas Boas E. V. Effect of hydrocooling on postharvest storage of sorrel (*Rumex acetosa* L.). *Food Chemistry Advances*, 2023, 3, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100394>
27. Kang D.-M., Khalil A. A. K., Park W. S., Kim H.-J., Akter K.-M., Bae J.-Y., Ahn M.-J. Anti-Helicobacter pylori activity of six major compounds isolated from *Rumex acetosa*. *American Chemical Society Omega*, 2023, 8(45), 42548–42554. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05282>
28. Silva L. F. L. E., Souza D. C. D., Resende L. V., Nassur R. D. C. M. R., Samartini C. Q., Gonçalves W. M. Nutritional evaluation of non-conventional vegetables in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2018, 90(2), 1775–1787. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170509>
29. Zeinali Pour N. Growth Stimulation and Nutritional Health of Sorrel in Controlled Environment Using Supplemental LED lamps and new water resources. *Greenhouse Plant Production Journal*, 2025, 2(2), 79-92. <https://doi.org/10.61882/gppj.2.2.79>
30. Bello O.M., Fasinu P.S., Bello O.E., Ogbesejana A.B., Adetunji C.O., Dada A.O., Ibitoye O.S., Aloko S., Oguntoye O.S. Wild vegetable *Rumex acetosa* Linn.: Its ethnobotany, pharmacology and phytochemistry – a review. *South African Journal of Botany*, 2019, 125, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.04.018>
31. Mendes F. D., Uliana D. S., Silva A. I. de S., de São José J. F. B. Unconventional food plants in mixed juices: evaluation of the nutritional, physical-chemical, microbiological, and sensory quality of orange juice with sorrel (*Rumex acetosa*) and taioba (*Xanthosoma sagittifolium*). *CyTA - Journal of Food*, 2024, 22(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2387716>
32. Кузнєцова К. Д. Розробка технології хлорофілвісних консервованих продуктів з листових овочів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.13. Одеська національна академія харчових технологій: Одеса, 2014. 19 с.
33. Kidmose U., Edelenbos M., Christensen L. P., Hegelund E. Chromatographic determination of changes in pigments in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during processing. *Journal of chromatographic science*, 2005, 43(9), 466-472. <https://doi.org/10.1093/chromsci/43.9.466>
34. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
35. Ткаченко С. Й., Снівак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.
36. Clydesdale F. M. Color as a factor in food choice. *Critical reviews in food science and nutrition*, 1993, 33(1), 83-101.

STUDY OF THE KINETICS OF DRYING DARK GREEN LEAFY VEGETABLES

Petrova Zh.O.¹, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (**Engin.**), **Koval I.O.²**, PhD student

¹*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, professor; bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, koval.igor.olegovich@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0006-5916-6912>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.3>

Nutrition plays a vital role in human health. Dark green leafy vegetables are rich in vitamins (especially K and folic acid), chlorophyll, antioxidants and other nutrients that support bone health, heart health and overall immunity. Dark green leafy vegetables include spinach, kale, arugula, romaine lettuce, Swiss chard, bok choy, sorrel, and turnip greens.

Folate is a water-soluble B vitamin that plays a vital role in cell growth and development. The names folic acid and folate come from the Latin word *folium*, meaning ‘leaf,’ and it was first isolated from spinach leaves in 1941.

Spinach (*Spinacia oleracea* L.) is an annual leafy green plant rich in beta-carotene (provitamin A), folic acid (vitamins A and C), minerals (phosphorus, sodium and potassium) and dietary fibre.

Sorrel (*Rumex acetosa* L.) is a perennial herbaceous plant with a high content of ascorbic acid and antioxidant properties; rich in minerals, vitamins and fibre; and also has a high protein content in its leaves.

Spinach and sorrel are vegetables that spoil quickly after harvesting and can only be consumed during the growing season. Drying is one method of preservation that extends the shelf life of these vegetables while preserving their vitamin content and preventing the growth and production of microorganisms that cause decay.

Dark green leafy vegetables are dried using the following methods: solar, convective, microwave, incineration, sublimation, convective-microwave, and others.

Convective drying is one of the most common methods for processing dark green leafy vegetables.

To stabilise folates, plant raw materials must be combined with raw materials that are high in vitamin C. Given that sorrel is high in vitamin C, it is advisable to add it to spinach to stabilise folates.

Therefore, **the aim of this work** is to study the drying processes of folate-containing raw materials based on spinach and sorrel.

The work involved conducting drying studies on an experimental convective bench using spinach, sorrel and mixtures based on these ingredients.

The results show that the drying time for these leafy vegetables is between 180 and 190 minutes at a heat transfer fluid temperature of 55°C. Creating a spinach-sorrel mixture allows you to preserve the folates found in spinach. Using high temperatures during drying accelerates the destruction of chlorophyll and folates, so it is advisable to use lower heat transfer parameters.

Ref. 36, figure 8.

Keywords: convective drying, folates, spinach, sorrel.

1. *Gunnala S., Buhlman L. M., Jadavji N. M.* How Increased Dietary Folic Acid Intake Impacts Health Outcomes Through Changes in Inflammation, Angiogenesis, and Neurotoxicity. *Nutrients*, 2025, 17(7), 1286. <https://doi.org/10.3390/nu17071286>

2. *Menezo Y., Elder K., Clement A., Clement, P.* Folic Acid, Folinic Acid, 5 Methyl TetraHydroFolate Supplementation for Mutations That Affect Epigenesis through the Folate and One-Carbon Cycles. *Biomolecules*, 2022, 12(2), 197. <https://doi.org/10.3390/biom12020197>

3. *Duthie S. J., Narayanan S., Brand G. M., Pirie L., Grant G.* Impact of folate deficiency on DNA stability. *The Journal of nutrition*, 2002, 132(8), 2444S-2449S. <https://doi.org/10.1093/jn/132.8.2444S>

4. *Blatch S. A., Stabler S. P., Harrison J. F.* The effects of folate intake on DNA and single-carbon pathway metabolism in the fruit fly *Drosophila melanogaster* compared to mammals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 189, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2015.07.007>

5. *Crider K. S., Bailey L. B., Berry R. J.* Folic acid food fortification-its history, effect, concerns, and future directions. *Nutrients*, (2011). 3(3), 370–384. <https://doi.org/10.3390/nu3030370>

6. *Eitenmiller R.R., Landen Jr. W.O., Ye L.* Vitamin Analysis for the Health and Food Sciences (2nd ed.). CRC Press.: Boca Raton, 2007. 664 p. <https://doi.org/10.1201/9781420009750>

7. O'Broin J.D., Temperley I.J., Brown J.P., Scott J.M. Nutritional stability of various naturally occurring monoglutamate derivatives of folic acid. *The American journal of clinical nutrition*, 1975, 28(5), 438–444. <https://doi.org/10.1093/ajcn/28.5.438>
8. Temple C.T., Montgomery J.A. Chemical and Physical Properties of Folic acid and Reduced Derivatives. In: Blackey R.L., Benkovic S.J., Eds., *Folates and Pterins*, Vol. 1, Chemistry and Biochemistry of Folates, 2nd Edition. John Wiley and Sons: New York, 1984. 61–120.
9. Sharma N., Gaikwad A.B., Kulkarni Y.A. Folic Acid in Pain: An Epigenetic Link. In *Nutritional Modulators of Pain in the Aging Population*. Academic Press, 2017. P. 245–251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805186-3.00021-7>
10. Evans W. C., Evans D. Vitamins and hormones. In *Trease and Evans' Pharmacognosy*. Elsevier: London, 2009. P. 451–458. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-2933-2.00031-9>
11. Bansal M., Singh N., Pal S., Dev I., Ansari K. M. Chemopreventive role of dietary phytochemicals in colorectal cancer. *Advances in molecular toxicology*, 2018, 12, 69–121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64199-1.00004-X>
12. Hasnain M. S. U., Zafar A., Rukh M., Khan M. K., Sultani H. M. A., Ashraf M. J. B. The botanical effects of selenium and zinc on biochemical attributes of spinach under varying salt conditions. *The Research of Medical Science Review*, 2025, 3(8), 331–338. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16809962>
13. Balkrishna A., Gautama A. K., Sharma N., Arya V., Khelwadea V. Effects of organic fertilizers on growth, and yield potential of spinach. *Agriculture Extension in Developing Countries (AEDC)*, 2025, 3(2), 109–115. <http://doi.org/10.26480/aedc.02.2025.109.115>
14. Morelock T.E., Correll J.C. *Spinach*. In: Prohens, J., Nuez, F. (eds) *Vegetables I. Handbook of Plant Breeding*, vol 1. Springer: New York, 2008, 189–218. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30443-4_6
15. Zhao X., Iwamoto T., Carey E. E. Antioxidant capacity of leafy vegetables as affected by high tunnel environment, fertilisation and growth stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(14), 2692–2699. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3032>
16. Watanabe M., Ayugase J. Effect of low temperature on flavonoids, oxygen radical absorbance capacity values and major components of winter sweet spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(10), 2095–2104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6925>
17. Simha P., Gugalia A. Thin layer drying kinetics and modelling of *Spinacia oleracea* leaves. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, 8(9), 1053–1066.
18. Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Husarova O.V. Intensyvnii sposoby sushinnia yabluchnykh slaisiv z konvektyvnym ta kombinovanyim enerhopidvedenniam [Intensive methods of drying apple slices with convective and combined energy supply]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka*, 2024, 46(4), 5–14. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.1> (in Ukr.).
19. Inyang U., Oboh I., Etuk B. Drying and the different techniques. *International Journal of Food Nutrition and Safety*, 2017, 8(1), 45–72.
20. Doymaz I. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 2009, 32(1), 112–125. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
21. Karaaslan S. N., Tuncer I. K. Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(1), 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012>
22. Grace M. H., Hoskin R. T., Hayes M., Iorizzo M., Kay C., Ferruzzi M. G., Lila M. A. Spray-dried and freeze-dried protein-spinach particles; effect of drying technique and protein type on the bioaccessibility of carotenoids, chlorophylls, and phenolics. *Food chemistry*, 2022, 388, 133017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133017>
23. Petrova Zh., Slobodianuk K. Rozrobka enerhoefektyvnoho rezhymu sushinnia fitoestrohennoi roslynnoi syrovyny [Development of an energy-efficient drying mode for phytoestrogenic plant raw materials]. *Scientific Works*, 2019, 83(1), 85–91. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1423> (in Ukr.).
24. Sniezhkin Yu.F., Petrova Zh.O. Enerhoefektyvni teplotekhnolohii pererobky funktsionalnoi syrovyny [Energy-efficient heat technologies for processing functional raw materials]. Kyiv: Naukova dumka, 2018. 187p. (in Ukr.).
25. da Silva E. C., Carlos L. D. A., Araújo A. P., Ferraz L. D. C., Pedrosa M. W., Silva L. S. Characterization of two types of azedinha in the region of Sete Lagoas, Brazil. *Horticultura Brasileira*, 2013, 31, 328–331. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000200025>
26. Ferreira Gomes B. A., de Barros H. E. A., Ntarelli C. V. L., Zitha E. Z. M., Carvalho E. E. N., de Barros Vilas Boas E. V. Effect of hydrocooling on postharvest storage of sorrel (*Rumex acetosa* L.). *Food Chemistry Advances*, 2023, 3, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100394>

27. Kang D.-M., Khalil A. A. K., Park W. S., Kim H.-J., Akter K.-M., Bae J.-Y., Ahn M.-J. Anti-Helicobacter pylori activity of six major compounds isolated from *Rumex acetosa*. *American Chemical Society Omega*, 2023, 8(45), 42548–42554. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05282>
28. Silva L. F. L. E., Souza D. C. D., Resende L. V., Nassur R. D. C. M. R., Samartini C. Q., Gonçalves W. M. Nutritional evaluation of non-conventional vegetables in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2018, 90(2), 1775–1787. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170509>
29. Zeinali Pour N. Growth Stimulation and Nutritional Health of Sorrel in Controlled Environment Using Supplemental LED lamps and new water resources. *Greenhouse Plant Production Journal*, 2025, 2(2), 79-92. <https://doi.org/10.61882/gppj.2.2.79>
30. Bello O. M., Fasinu P. S., Bello O. E., Ogbesejana A. B., Adetunji C. O., Dada A. O., Ibitoye O. S., Aloko S., Oguntoye O. S. Wild vegetable *Rumex acetosa* Linn.: Its ethnobotany, pharmacology and phytochemistry – a review. *South African Journal of Botany*, 2019, 125, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.04.018>
31. Mendes F. D., Uliana D. S., Silva A. I. de S., de São José J. F. B. Unconventional food plants in mixed juices: evaluation of the nutritional, physical-chemical, microbiological, and sensory quality of orange juice with sorrel (*Rumex acetosa*) and taioba (*Xanthosoma sagittifolium*). *CyTA - Journal of Food*, 2024, 22(1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2387716>
32. Kuznietsova K. D. Rozrobka tekhnolohii khloro-filvmisnykh konservovanykh produktiv z lystovykh ovochiv [Development of technology for chlorophyll-containing canned products from leafy vegetables]: abstract of thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.18.13. Odessa National Academy of Food Technologies: Odessa, 2014. 19p.
33. Kidmose U., Edelenbos M., Christensen L. P., Hegelund E. Chromatographic determination of changes in pigments in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during processing. *Journal of chromatographic science*, 2005, 43(9), 466-472. <https://doi.org/10.1093/chromsci/43.9.466>
34. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, 22(6), P. 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>
35. Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu. Sushylni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk [Drying processes and installations. Study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2007. 76 s. (in Ukr.).
36. Clydesdale F. M. Color as a factor in food choice. *Critical reviews in food science and nutrition*, 1993, 33(1), 83-101.

Отримано 01.10.2025

Received 01.10.2025

Прийнято до друку 04.11.2025
Accepted for publication 04.11.2025