

УДК 664.8.047

ПЕРЕРОБКА БІЛКОВОВМІСНОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ НА СУХИЙ ПРОДУКТ

Петрова Ж. О.¹, гол. наук. співр., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України,
<https://orcid.org/0000-0001-7385-8495>,

Кузнєцова І. В.², с.н.с., д.с.-г.н.,

<https://orcid.org/0000-0001-8530-2099>

Самойленко К. М.¹, с.н.с., к.т.н., ст. досл.,

<https://orcid.org/0000-0002-5169-4466>

Петров П. І.¹, мол. наук. співр., аспірант,

<https://orcid.org/0009-0006-0632-3558>

Маноха Д. О.¹, пр. інженер

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

²Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-03>

Предмет. Тепломасообмінні процеси при сушінні білкововмісної сировини рослинного походження. **Purpose.** Дослідити кінетику зневоднення білкововмісної сировини на основі бобових та культивованих грибів шиїтаке з підбором найбільш ефективних методів та їх вплив на тривалість процесу і якість досліджуваної сировини. **Методи.** Білкововмісна сировина на основі квасолі та гороху були висушені конвективним способом за температури теплоносія 70°C із попередньою підготовкою сировини до зневоднення з метою позбавлення сировини антихарчових компонентів. Культивовані гриби шиїтаке були висушені комбінованим методом (конвективним та інфрачервоного випромінювання при потужності лампи 3800 Вт/м²). Коефіцієнт набухання культивованих грибів визначали методом зважування за методикою Б. В. Зозулевича. **Результати.** В статті представлено сучасний спосіб переробки шляхом сушіння білкововмісної сировини рослинного походження бобових на прикладі гороху і квасолі, а також переробку культивованих грибів шиїтаке. Експериментальні дослідження попередньої підготовки сировини до сушіння на основі бобових включає процес купажування – поєднання гороху чи квасолі із каротиновмісною сировиною (морква). В результаті отримані білково-каротиновмісні суміші горохово-морквяна та квасолево-морквяна у співвідношенні 1:2 відповідно. Це дало позитивний результат для перетворення каротиноїдів моркви у провітамін А у присутності білків та жирів та запобігання окисленню попередніх. Експериментально доведено, найбільш ефективний режим зневоднення для білково-каротиновмісних сумішей є при температурі зневоднення 70°C. Для культивованих грибів шиїтаке найефективнішим є комбінований інфрачервоно-конвективний метод 3800 Вт/м² + 60°C. За рахунок правильно підбраного режиму не відбувається окислення грибів, що є запорукою світлого кольору сухого продукту та відновлюваність є максимальною. **Сфера застосування результатів.** В подальшій розробці теплотехнології отримання порошку із білкововмісної сировини рослинного походження будуть використані результати даного дослідження.

Ключові слова: сушіння, відновлюваність, білкововмісна сировина рослинного походження, рослинний білок, квасоля, горох, культивовані гриби

PROCESSING OF PROTEIN-CONTAINING VEGETABLE RAW MATERIALS INTO DRY PRODUCT

Zhanna Petrova¹, Chief Researcher, D-r of Sc., Technical, Professor,
 Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0001-7385-8495>

Inha Kuznietsova², D-r of Sc., Agriculture, Senior Researcher,
<https://orcid.org/0000-0001-8530-2099>,

Kateryna Samoilenko¹, Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-5169-4466>

Pavlo Petrov¹, Junior Researcher, Postgraduate,
<https://orcid.org/0009-0006-0632-3558>

Dmytro Manokha¹, lead engineer

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of food resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

Subject. Heat and mass transfer processes during drying of protein-containing raw materials of plant origin. **Purpose.** To investigate the kinetics of dehydration of protein-containing raw materials based on legumes and cultivated shiitake mushrooms with the selection of the most effective methods and

their effect on the duration of the process and the quality of the raw materials under study. **Methods.** Protein-containing raw materials based on beans and peas were dried convectively at a heat carrier temperature of 70°C with preliminary preparation of raw materials for dehydration in order to remove anti-nutritional components. The cultured shiitake mushrooms were dried by a combined method (convective and infrared radiation at a lamp power of 3800 W/m²). The swelling coefficient of the cultured mushrooms was determined by weighing according to the method of B. V. Zozulevich. **Results.** The article presents a modern method of processing by drying protein-containing raw materials of plant origin of legumes on the example of peas and beans, as well as processing of cultivated shiitake mushrooms. Experimental studies of the preliminary preparation of raw materials for drying based on legumes include the process of blending – combining peas or beans with carotene-containing raw materials (carrot). As a result, protein-carotene-containing pea-carrot and bean-carrot mixtures were obtained in a ratio of 1:2, respectively. This gave a positive result for the conversion of carrot carotenoids into provitamin A in the presence of proteins and fats and preventing the oxidation of the previous. It has been experimentally proven that the most effective dehydration regime for protein-carotene mixtures is at a dehydration temperature of 70°C. For cultivated shiitake mushrooms, the most effective is the combined infrared-convective method of 3800 W/m² + 60°C. Due to the correctly selected mode, mushrooms do not oxidise, which is the key to the light colour of the dry product and the maximum recovery. **Scope of the results.** The results of this study will be use in the further development of thermal technology for obtaining powder from protein-containing raw materials of plant origin.

Key words: drying, renewability, protein-containing raw materials of plant origin, vegetable protein, beans, peas, cultivated mushrooms

Постановка проблеми. Білок це життєво важлива поживна речовина, необхідна для створення, підтримки і відновлення тканин, клітин і органів по всьому тілу. Білок сприяє енергетичному обміну і клітинним процесам, а також захищає організм від хвороб за допомогою оптимальної імунної функції. Білок розщеплюється на 20 амінокислот, які є основними будівельними блоками організму для росту і енергії. Амінокислота триптофан впливає на настрій, виробляючи серотонін, який може зменшити симптоми депресії і занепокоєння і поліпшити загальну когнітивну функцію.

Основними перевагами щоденного вживання в їжу білку є: необхідність для росту та розвитку, підтримка імунної системи, прискорення відновлення організму після навантажень, підтримка здорової ваги. До білкововмісної сировини рослинного походження відносяться гриби, бобові (квасоля, горох), які були взяті для досліджень[1].

До основних методів переробки білкововмісної сировини відносять конвективне сушіння. Однією із переваг серед інших методів є те, що цей процес відбувається без застосування консервантів чи підсилювачів смаку, таких як глутамат натрію, нітрит натрію, харчові барвники, ароматизатори, антизлежувачі та ін.

Переробка бобових (квасоля, горох) на сухий продукт є складним завданням. Здебільшого сировину перемелюють у борошно та використовують як білок рослинного походження.

Горох та квасоля є продуктами з низькою ціною та високою харчовою цінністю, які широко споживаються людьми в усьому світі. Серед бобових горох є хорошим джерелом рослинного білка, оскільки вміст білка в горосі високий і становить приблизно 22,3 г білка/100 г [2]. Хоча антинутриєнти (включаючи фітинову кислоту, дубильні речовини та протеолітичні інгібітори), виявлені в горосі, знижують засвоюваність цього білка, замочування, варіння або запікання гороху може зменшити антинутриєнти та підвищити біоактивність білка [2].

Продукти з високим вмістом ліпідів чутливі до окислення з утворенням вторинних продуктів, які надають висушеним матеріалам небажаний смак і запах. Для запобігання цих проблем використовують природні стабілізатори.

У статті [3] досліджено вплив обробки на м'яко очищені екстракти білка гороху. Білкові екстракти на стадії підготовки нагрівали або не нагрівали, а далі використовували сублімаційне і розпилювальне сушіння. Висновком роботи є те, що по-перше, нагрівання шляхом сушіння розпиленням призвело до підвищення гідрофобності поверхні білків та/або агрегатів, і, по-друге, інтенсивне нагрівання призвело до агрегації глобулінів [3].

Для зразків, висушених заморожуванням і розпиленням, значних відмінностей не спостерігалось. Ключовим відкриттям є вплив нагрівання на об'ємні властивості. Як правило, зміна властивостей нагрітого білка, що стабілізує поверхню та спінювання, пояснюється агрегатами (поглинанням на поверхні розділу або стабілізацією в плівці між повітряними бульбашками) та вищою гідрофобністю поверхні білка. Продемонстровано, що агрегація

глобулінів при нагріванні, в той час як білки альбуміну залишаються розчинними, призводить до відносного збагачення розчинних альбумінів.

Дослідження описане в [4] показує, що можна отримати вихід до 93% сухої екстракції протеїну квасолі методом водного фракціонування, в результаті чого отримують концентрати з вмістом білка понад 70%. Комбінація інших обробок (термічних чи ні), що застосовуються до або після екстракції, може покращити вихід екстракції та функціональні властивості білків відповідно. Сухе фракціонування забезпечує вихід до 30%, який можна покращити за допомогою електростатичного розділення. Білки квасолі мають такі ж або кращі характеристики, ніж соєві, щодо емульгувальних властивостей, високої гідрофобності та піноутворення. Сухе фракціонування є більш стійким методом екстракції білка, оскільки він використовує мало ресурсів і зберігає нативні властивості білків. Водне фракціонування гарантує більш високий вихід білка. Сушена квасоля є сировиною з величезним потенціалом для вилучення білка та застосування його білка у виробництві харчових продуктів на рослинній основі з доданою вартістю та високою харчовою користю для здоров'я [4].

Дослідження представлене у [1] дає можливість отримати білкововмісний сухий продукт на основі квасолі чи гороху, не застосовуючи процеси екстракції та інші. Альтернативою замість цього запропоновано удосконалену попередню підготовку сировини до сушіння та конвективне зневоднення. Ці дослідження були нами розроблені в Інституті технічної теплофізики НАН України [1]. Як відомо, природніми стабілізаторами, які запобігають окисленню жирів є каротиноїди, які на 95% представлені в моркві. Тому нами були проведені експериментальні дослідження з оптимального співвідношення бобових та моркви. Ця попередня підготовка включає купажування, а саме - білкововмісну сировину рослинного походження (квасоля чи горох) поєднували із каротиновмісною сировиною (морква) у співвідношенні 1 частина білкововмісної сировини та 2 частини моркви. Отже, було створено квасолево-морквяну та горохово-морквяну суміші. Це дало позитивний результат для перетворення каротиноїдів моркви у провітамін А у присутності білків та жирів та запобігання окисленню попередніх [5].

Оскільки майже всі бобові містять різні анти поживні речовини (інгібітори ферментів – зокрема трипсини, алкалоїди тощо), то більшість цих речовин білкової природи, можна інактивувати за допомогою термічної обробки. Тому перед купажуванням сировини попередньо потрібно підготувати білкововмісну сировину. Для цього квасоллю та горох замочували водопровідною водою температура якої становить 20°C. Воду зливали, додавали нову порцію у співвідношенні бобів та води 1:5. Для інактивації інгібіторів трипсину, проводили варку бобів протягом 15 хв [1]. Після цього білкововмісну сировину подрібнювали на кутері, а моркву натрали на терці, далі проводили купажування та процес сушіння.

Представлені білкововмісні продукти на основі гороху чи квасолі передбачають новий підхід до традиційного харчування, актуальною перевагою якого має бути не лише задоволення голоду, відсутності небажаного впливу на здоров'я та обслуговування життєдіяльності організму, а й використання харчових продуктів для покращення здоров'я таким чином, щоб запобігти ризику хронічних захворювань типу серцево-судинних, онко, ожиріння та інше [1]. Купажування бобових та моркви надає продукту функціональних властивостей, які мають пряме відношення до здорового харчування.

Гриби теж можна віднести до білкововмісної сировини рослинного походження, які є надзвичайно корисною заміною тваринного білку в раціоні людини. Проте, вони мають невеликий термін зберігання після збору врожаю - 1-3 дні (температура навколишнього середовища) і 3–5 днів при температурі 4°C. Одним із способів продовжити термін придатності є сушіння. На основі аналізу літературного огляду робіт, які присвячені проблемам сушіння культивованих грибів, обґрунтовано висновок про необхідність інтенсифікації процесу сушіння із збереженням високої якості кінцевої продукції за допомогою використання комбінованого енергопідведення. Основними методами сушіння культивованих грибів сьогодні є конвективне, терморадіаційне, мікрохвильове, вакуумне, ліофільне тощо [6–12].

Популярним є напрямком комбінованого сушіння – поєднання декількох методів. Недоліком основних розглянутих методів є висока вартість. Із якісних показників дослідниками визначається вміст полісахаридів, вітамінів B₁₂ і D₂, коефіцієнт усадки, регідратацію, колірність, вміст вільних амінокислот, леткі сполуки, досліджують мікроструктуру, твердість тощо [11, 13, 14].

Сублімаційне сушіння є найбільш поширеним способом зневоднення. Проте, цей метод є досить складним і вартісним, тому не набув широкого використання. Специфічні властивості

окремих продуктів зумовлюють різні вимоги до процесу сушіння, а, отже, і до режиму його проведення. Під час організації сушіння необхідно врахувати технологічні властивості продуктів, як об'єктів сушіння. Значення цих властивостей і закономірностей зміни їх під час сушіння залежно від параметрів процесу дає можливість вибору найбільш раціонального способу і режимів сушіння.

Раціональні параметри сушіння забезпечують мінімальні витрати енергії при максимальному збереженні високої якості продуктів. Інтенсифікація багатьох способів сушіння відбувається, головним чином, за рахунок підвищення температури сушильного агента. Проте для деяких продуктів застосування високих температур взагалі неприпустимо з технологічних міркувань (сушіння овочів, фруктів тощо) [15].

Будь-який метод зневоднення має переваги та недоліки [16]. З огляду літературних джерел відомо, що для конвективного сушіння питомі енерговитрати коливаються від 6,0 до 12,5 МДж/кг за тривалості процесу 1200 секунд [17–20]. Для сублімаційного сушіння він коливається від 10,0 до 14,0 МДж/кг при тривалості процесу від $36 \cdot 10^3$ до $254 \cdot 10^3$ секунд [21–22]. Радіаційне сушіння вимагає від 3,0 до 4,5 МДж/кг при тривалості процесу до 900 секунд [23; 28]. Мікрохвильове сушіння коливається від 8,0 до 13,0 МДж/кг [24–27], тоді як вакуумне сушіння вимагає від 3,0 до 4,0 МДж/кг для тривалості процесу до 5100 секунд. З іншого боку, кондуктивне сушіння споживає від 5,0 до 7,0 МДж/кг при тривалості процесу до 3600 секунд [29–31].

Матеріали та методи. Квасоллю та жовтий горох, моркву та свіжі культивовані гриби Шіїтаке, сортовані за формою, зрілістю і розміром були придбані в мережі супермаркетів у м. Київ. Усі досліджувані зразки доставили в лабораторію та зберігали при температурі $4 \pm 0,5^\circ\text{C}$ і відносній вологості 95% у холодильнику перед експериментом. Усі зразки, використані для сушіння, були придбані з однієї партії.

Досить точні результати дає кількісне визначення досліджуваних каротиноїдів при зміні оптичної густини за допомогою спектрофотометра СФ-26. Каротиноїди знаходяться в хромопластах клітин і оточені водним середовищем. Тому, чим більш тонко подрібнений матеріал, тим більш повно вилучаються каротиноїди. Перед екстракцією матеріал зневоднюється, так як каротиноїди – жиророзчинні речовини. В даному випадку для визначення суми каротиноїдів необхідно взяти наважку 0,1–2 г. Величина наважки має значення при вирішенні питання виробу методу виділення та ідентифікації каротиноїдів [1].

Зневоднення наважки проводиться етанолом, ретельно розтираючи її в ступці, для виділення залишкової вологи.

Для подрібнення сирової вихідної продукції дослідний матеріал розтирають в ступці з невеликою кількістю кварцового піску до одержання однорідної маси.

Вміст каротиноїдів визначали за формулою:

$$X = \frac{10 \cdot D \cdot V \cdot V_2}{E \cdot V_1 \cdot m} 100, \text{ мг/100 г} \quad (1)$$

де D – оптична густина досліджуваного розчину при визначеній довжині хвилі (β -каротин в гексані визначається при довжині хвилі 453 нм);

E – екстинція (питомий показник поглинання при тій же довжині хвилі, яка приймалася для β -каротину в гексані і дорівнює 2592);

100 – коефіцієнт перерахунку на 100 г аналізованої проби;

V – загальний об'єм екстракту, мл;

m – маса наважки, г;

V_2 – об'єм кювети, мл;

V_1 – об'єм екстракту для спектрофотометра.

При перерахунку вмісту каротиноїдів або суми каротиноїдів на абсолютно суху речовину було враховано вологість досліджуваного матеріалу.

При дослідженнях використовували середнє значення трьох паралельних експериментів [1].

Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини рослинного походження проведено на конвективному сушильному стенді, який обладнаний автоматичною системою обробки та збору інформації, що дозволяє більш точно характеризувати процес сушіння із побудовою кривих сушіння та швидкості сушіння [32].

Експерименти із дослідження кінетики сушіння квасолево-морквяної та горохово-морквяної сумішей проводились за температури 60°C , 70°C , 80°C , 100°C та швидкості теплоносія 3,5 м/с (найбільш оптимальна швидкість для цього матеріалу була визначена в [1]).

Експерименти із дослідження кінетики сушіння культивованих грибів шиїтаке проводились при швидкості теплоносія $v = 3$ м/с (швидкість вибиралася з умови більш ефективного сушіння цього ж матеріалу в існуючих сучасних сушарках); при температурі теплоносія 60°C, 100°C, 100/60°C та інфрачервоному випромінюванні 3800 Вт/м² при сушінні на конвективному стенді; а також комбінований спосіб 3800 Вт/м² + 60°C (інфрачервоно- конвективне).

Результати та обговорення. В процесах сушіння визначальними є процеси тепломасообміну. Від їхньої інтенсивності залежать ефективність сушіння та економічність використання матеріальних і енергетичних ресурсів [33].

Характер протікання процесу сушіння найбільш повно описується кривими сушіння (в координатах вологість матеріалу - час), кривими швидкості сушіння (в координатах швидкість сушіння – вологість матеріалу) та температурними кривими (в координатах температура матеріалу - вологість).

В статті представлені експериментальні дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини рослинного походження на прикладі квасолево-морквяної композиції, грибів шиїтаке.

На рис. 1 представлено вплив температури теплоносія на процес сушіння квасолево-морквяної композиції (1:2) в шарі. З підвищенням температури теплоносія від 60 до 100°C тривалість сушіння квасолево-морквяної суміші від початкової вологості 190% до кінцевої 10% зменшується в 1,92 рази.

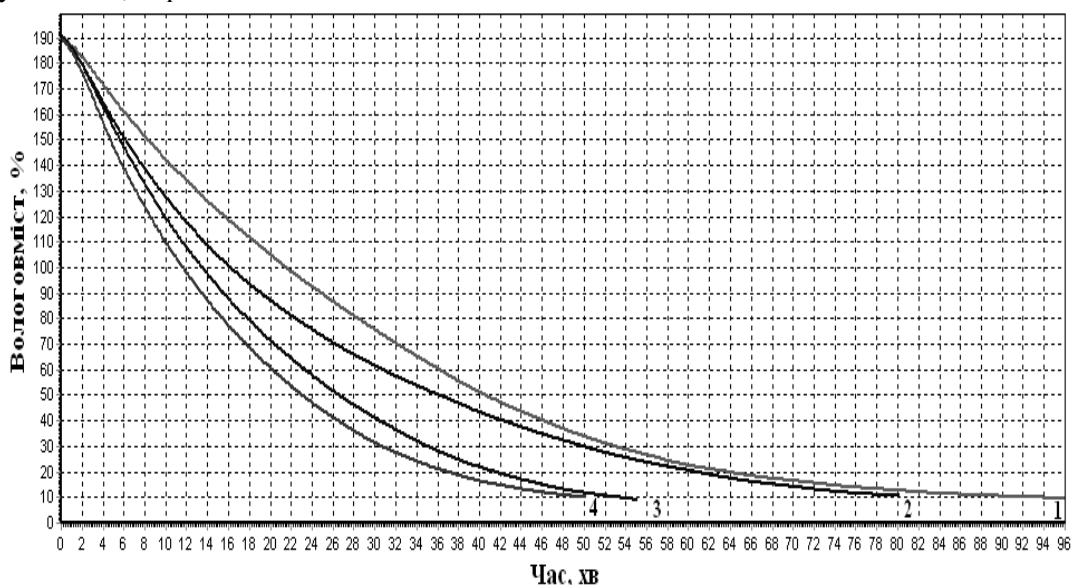


Рис. 1. Вплив температури теплоносія на процес сушіння квасолево-морквяної композиції (1:2) в шарі $\delta = 10$ мм при $W_k^c = 8\%$; $V = 3,5$ м/с; $d = 10$ г/кг с. п.:
1 – 60°C, 2 – 70°C, 3 – 80°C, 4 – 100°C

Максимальна швидкість сушіння при температурі теплоносія 100°C складає 8,5%/хв., що більше за максимальну швидкість при температурі 60°C в 1,7 рази (рис. 2).

Змішування бобових культур (гороху та квасолі) з морквою та наступна термічна обробка показало високе збереження каротиноїдів з насиченням утвореного продукту білками та жиром.

Сушіння при температурі 60–80°C не забезпечує високого збереження каротиноїдів і відрізняється в сторону зменшення від температури 70°C на 6,4...9,4%. При температурі сушіння 100°C квасолево-морквяної композиції втрати каротиноїдів складають 58,8%.

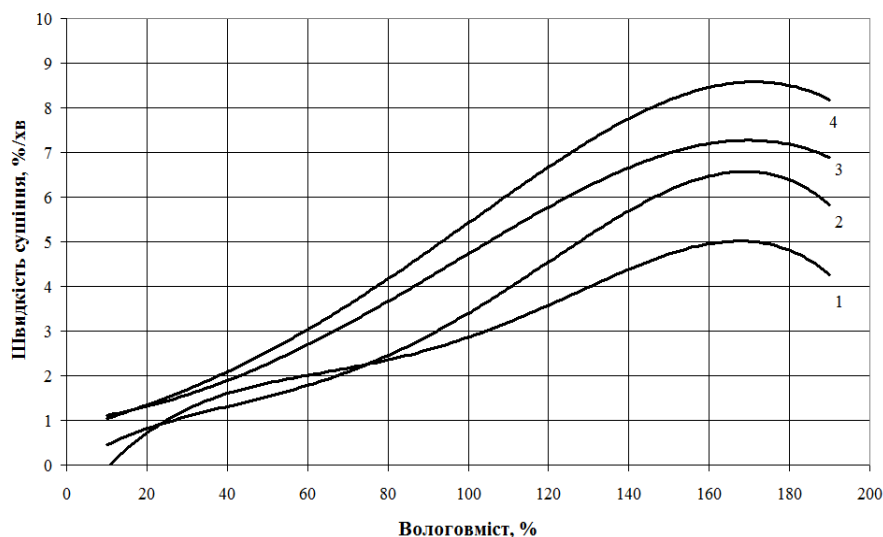


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння квасолево-морквяної композиції (1:2) в шарі $\delta = 10$ мм, $W_k^c = 8\%$; $V = 3,5$ м/с; $d = 10$ г/кг с. п.: 1 – 60°C, 2 – 70°C, 3 – 80°C, 4 – 100°C

Високий вміст ліпідів та білку призводить до окислення з утворенням вторинних продуктів, які надають небажаний смак і запах. Для запобігання цих проблем нами були використані природні стабілізатори, яким є каротиноїди. Тому збереження каротиноїдів свідчить про високу якість отриманих сушених продуктів.

На рисунках 3, експериментальні дослідження з сушіння горохово-морквяної композиції у діапазоні температур теплоносія від 60°C до 100°C. Результати досліджень представлені у вигляді кривих кінетики зневоднення, швидкості сушіння та температурних кривих наведені на рис. 4 та 5. Тривалість сушіння матеріалу в режимі теплоносія 100°C зменшується в 2,25 раз в порівнянні з тривалістю процесу при 60°C (рис. 3).

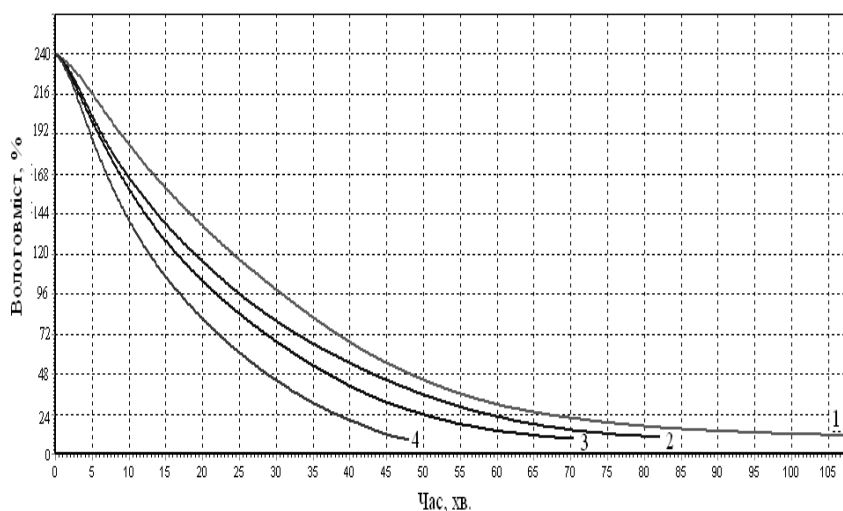


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на процес сушіння горохово-морквяної композиції (1:2) в шарі $\delta = 10$ мм, $V = 3,5$ м/с; $W_k^c = 8\%$; $d = 10$ г/кг с. п.: 1 – 60°C, 2 – 70°C, 3 – 80°C, 4 – 100°C

Однак у режимі теплоносія 100 °C спостерігається різке підвищення температури матеріалу, і після того як матеріал досяг температури 80–90°C, відбулось незначне потемніння та псування зовнішнього вигляду, що свідчить про втрату якісних показників продукту. Сумісний аналіз отриманих даних показав, що процес сушіння бінарної суміші проходить у другому періоді сушіння (рис. 4).

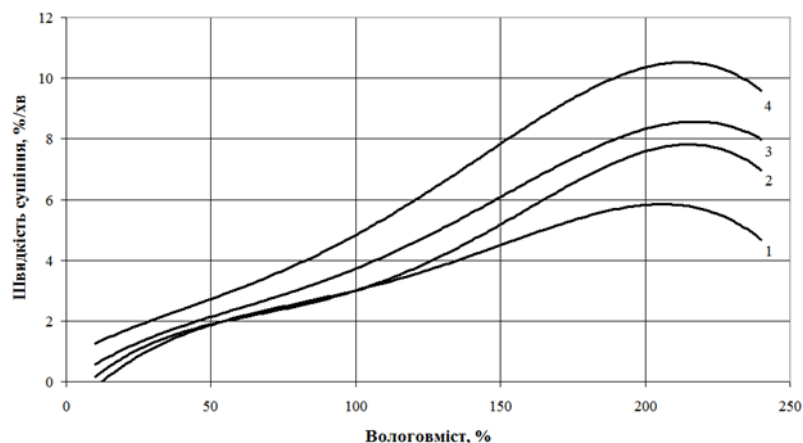


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння горохово-морквяної композиції (1:2) від температури теплоносія $\delta = 10$ мм, $V = 3,5$ м/с; $W_k^c = 8\%$; $d = 10$ г/кг с. п.: 1 – 60°C, 2 – 70°C, 3 – 80°C, 4 – 100°C

Криві сушіння досліджуваної сировини мають вигляд характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. В міру поглиблення зони випаровування всередину матеріалу температура його поверхні підвищується, а швидкість вологовіддачі зменшується. Криві швидкості сушіння показують, що із збільшенням температури теплоносія інтенсивність зневоднювання зростає. З підвищенням температури теплоносія максимальна швидкість сушіння підвищується і зсувається в сторону меншого вологовмісту матеріалу. Так при температурі теплоносія 100°C максимальна швидкість складає 10,5%/хв., що в 1,75 рази більше за максимальну швидкість при температурі 60°C.

На рис. 5 представлено зміну температури матеріалу в шарі 10 мм в процесі сушіння, для чого в середину центральної частини зразка вводилась хромель-копелева термопара товщиною 0,25 мм. Інтенсивність прогрівання матеріалу вища при температурі 100°C і при тривалості 48 хв становить 92°C, що в 2,2 рази вище за температуру 60°C, що становить 42°C.

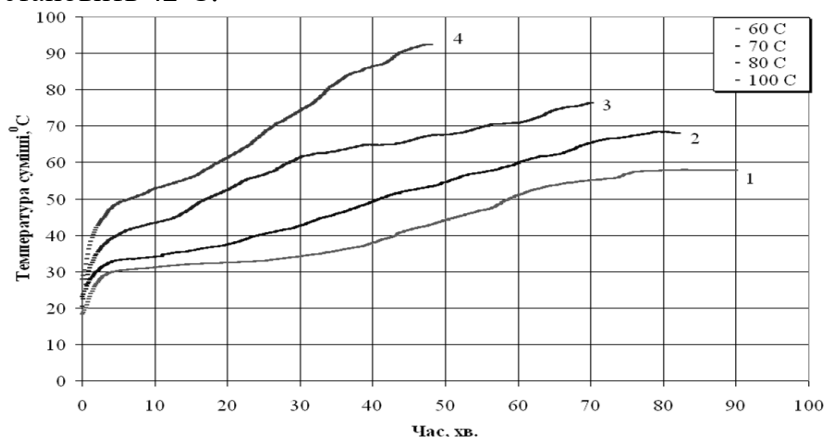


Рис. 5. Зміна температури в середині шару горохово-морквяної композиції (1:2) від температури теплоносія $\delta = 10$ мм, $V = 3,5$ м/с; $W_k^c = 8\%$; $d = 10$ г/кг с. п.: 1 – 60°C, 2 – 70°C, 3 – 80°C, 4 – 100°C

Вибір режиму сушіння залежить від якісних показників горохово-морквяної суміші, яка оцінювалась за відсотком збереження каротиноїдів. Як показали проведені дослідження температура теплоносія впливає на якість висушеного матеріалу. При температурі 100°C каротиноїди у горохово-морквяній композиції зберігаються лише на 52%. Температура 60°C також призводить до втрат каротиноїдів. Оптимальною температурою сушіння горохово-морквяної композиції є температура теплоносія 70°C при якій на 97,9% зберігаються каротиноїди, як і чистої моркви. Така висока температура сушіння білкововмісних продуктів можлива лише в присутності моркви.

Дослідження кінетики сушіння культивованих грибів представлено на рис. 6–7. Досліджено зміну вологості культивованих грибів Шійтаке при конвективному сушінні та ІЧВ (інфрачервоному випромінюванні при сушінні на конвективному стенді), як зображено на рис. 6. На графіку показана порівняльна характеристика конвективного режиму 60°C (криві 1,1'), режиму сушіння при інфрачервоному випромінюванні 3800

Вт/м² на конвективному стенді із температурою навколишнього середовища 20°C – далі ІЧВ (криві 2,2') та комбінованого (інфрачервоно-конвективного) режиму 3800 Вт/м²+60°C (криві 3,3').

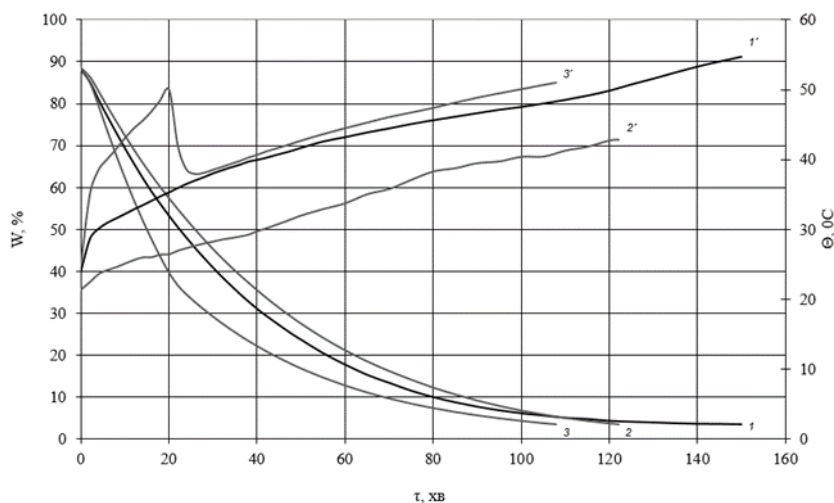


Рис. 6. Зміна вологості культивованих грибів Шіїтаке при конвективному сушінні та ІЧВ (інфрачервоному випромінюванні при сушінні на конвективному стенді) $\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с. п: 1,1' – 60°C; 2,2' – 3800 Вт/м² (при 20°C); 3,3' – 3800 Вт/м² + 60°C

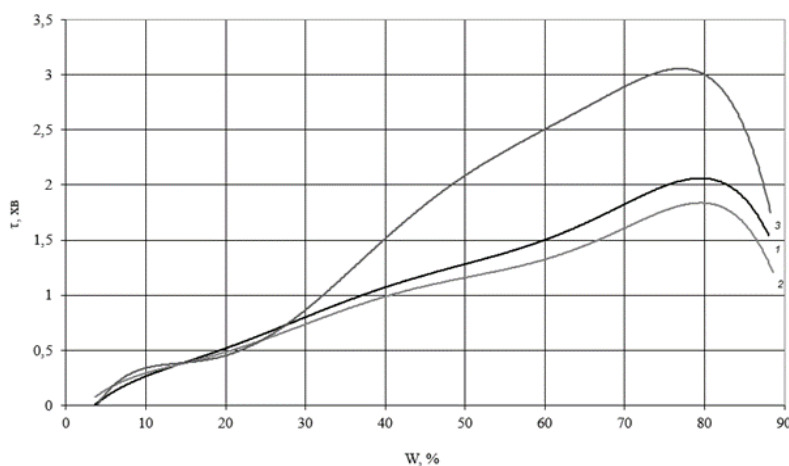


Рис. 7. Вплив температури теплоносія при конвекції та ІЧВ (інфрачервоного випромінювання) при сушінні на конвективному стенді на швидкість сушіння грибів Шіїтаке $\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с. п: 1 – 60°C; 2 – 3800 Вт/м² (при 20°C); 3 – 3800 Вт/м² + 60°C

Як видно з рис. 6, тривалість сушіння при ІЧВ (криві 2,2') становить 122 хв, що є на 19% швидше, ніж при конвективному режимі 60°C. Крива 3,3' показує комбіноване сушіння – на початку процесу було одночасно подано два види теплоносії (ІЧВ 3800 Вт/м² та конвективне 60°C). При досягненні досліджуванним зразком температури 50°C на 20-ій хвилині експерименту, один із теплоносіїв (ІЧВ 3800 Вт/м²) було вимкнено. При цьому спостерігається різке зниження температури матеріалу до 39°C із подальшим поступовим нагрівом. Комбіноване сушіння (криві 3,3') триває 110 хв та при цьому відбувається інтенсифікація процесу сушіння у 1,4 р у порівнянні із режимом 60°C. Швидкість сушіння при конвективному режимі 60°C становить 2,0%/хв, при ІЧВ 3800 Вт/м² – 1,8%/хв, при комбінованому 3800 Вт/м² + 60°C є найбільшою – 3%/хв (рис. 7).

Для висушеної сільськогосподарської продукції регідратаційні характеристики часто використовуються як індекс структурної якості. Ці характеристики значною мірою залежать від умов сушіння, що застосовувалися.

Одним із основних показників регідратаційних характеристик сушеної продукції є відновлюваність та коефіцієнт набухання – це показник якості, що показує наскільки харчовий продукт здатен відновлюватись після сушіння та дорівнює відношенню об'єму набухлої породи до її максимально первісного об'єму.

На рис. 8 представлено залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння. Досліджувався матеріал у вигляді пластини, які висушені на експериментальному стенді

при різних температурних режимах теплоносія. Також з них були отримані зразки у вигляді порошку.

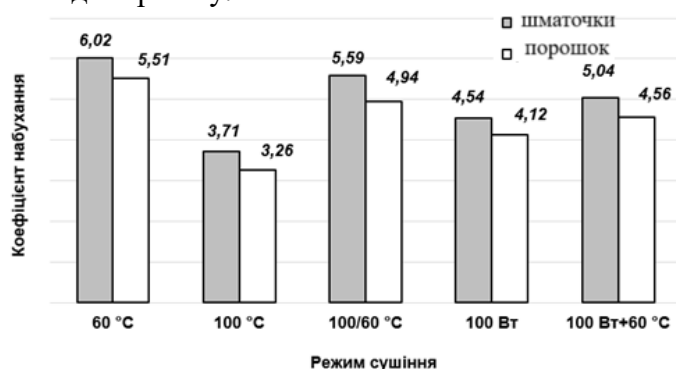


Рис. 8. Залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння

Як видно з рисунку 8, коефіцієнт набухання K_n зразків, які були представлені у вигляді шматочку, для кожного режиму має на 9-12% більше значення, ніж для зразків у вигляді порошків. На наш погляд, в шматочку структурний скелет фізично не порушується, а у порошкоподібному стані вже відбувається порушення скелету матеріалу, який стає мілкодисперсним. Під час експерименту з порошку у воду виходять сухі речовини, тому нижча вага і відновлюваність, а в шматочку вони залишаються незмінними. Тобто, ці два режими не лише є енергоефективними, а й зберігають фізичні властивості матеріалу максимально.

Висновки. Враховуючи отримані експериментальні дані кінетики сушіння білковомісної сировини рослинного походження на прикладі квасолево-морквяної та горохово-морквяної сумішей, культивованих грибів шиїтаке, нами розроблено найбільш ефективні режими зневоднення, з метою скорочення тривалості процесу при зменшенні енерговитрат. Зокрема, для квасолево-морквяної суміші температура зневоднення 70°C. Для культивованих грибів шиїтаке – комбінований інфрачервоно-конвективний метод 3800 Вт/м² + 60°C, при цьому зменшується тривалість сушіння в 1,4 р. у порівнянні з режимом 60°C, за рахунок чого майже не відбувається окислення грибів, що є запорукою світлого кольору сухого продукту. Проведені експериментальні дослідження по відновлюваності висушених грибів шиїтаке показали правильність вибраних режимів. Як показали дослідження сушіння білковомісної сировини рослинного походження, процес зневоднення цієї сировини має схожий характер за рахунок високого вмісту білку.

Бібліографія

- Петрова Ж. О., Снежкін Ю. Ф. Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини. Монографія. Навкова думка. 2018. 187 с.
- Chen W., Chiu H. T., Feng Z., Maes E., Serventi L. Effect of spray-drying and freeze-drying on the composition, physical properties, and sensory quality of pea processing water (Liluva). 2021. Foods, 10 (6), 1401.
- Burger T. G., Singh I., Mayfield C., Baumert J. L., Zhang, Y. The impact of spray drying conditions on the physicochemical and emulsification properties of pea protein isolate. Lwt. 2022. 153, 112495.
- Ferreira K. C., Bento J. A. C., Caliani M., Bassinello P. Z., Berrios J. D. J. Dry bean proteins: Extraction methods, functionality, and application in products for human consumption. Cereal Chemistry. 2022. 99 (1), 67–77.
- Petrova Zh. O., Sniezhkin Yu. F., Slobodianiuk K. S. Energy-saving heat technologies for obtaining soy based plant powders: monograph. Kyiv: PH Akademperiodyka. 2021. 96.
- Argvropoulos D., Müller J. Convective drying and desorption isotherms of Shiitake (Lentinula edodes) mushroom. Agricultural and Food Sciences. 2013.
- Argvropoulos D., Khan M.T., Müller. J. Effect of drying temperature and pre-treatment on color and textural changes during convective air drying of Boletus edulis mushroom. 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 3–6 October 2010, 1404-1409.

8. Avdieieva L., Zhukotskvi E., Dekusha H., Ivanov S. Analysis of the existing methods and specific features of drying shiitake mushrooms. *Food science and technology*. 2021. 15(3):94–107. <https://doi.org/10.15673/fst.v15i3.2118>.
9. Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak T. Microwave food processing – A review. *Food Research International*. 2013. 52 (1), 243–261.
10. Дубковецкий І. В., Малежик І. Ф., Бурлака Т. В. Визначення основних тепломасообмінних параметрів сушіння культивованих грибів при різних способах енергопідведення. *Навкові праці ОНАХТ*. 2016. 80 (1), 53–58.
11. Hu L., Bi J., Jin X., Oiu Y. Study on the Rehydration Quality Improvement of shiitake Mushroom by Combined Drying Methods. *Foods*. 2021. 10. 769. <https://doi.org/10.3390/foods10040769>.
12. Kantrong H., Tansakul A., Mittal GS. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of food science and technology*. 2014. 51 (12), 3594–3608.
13. Hataichanok Kantrong, Ampawan Tansakul, Gauri S. Mittal Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *J Food Sci Technol*. 2014. 51(12), 3594–3608.
14. Xiao Yang, Yuyu Zhang, Yan Kong, Jing Zhao, Ying Sun & Mingquan Huang Comparative analysis of taste compounds in shiitake mushrooms processed by hotair drying and freeze drying, *International Journal of Food Properties*. 2019. 22 (1), 1100–1111. 10.1080/10942912.2019.1628777.
15. Sniezhkin Y. F., Petrov P. I. Вибір раціонального режиму сушіння м'яса курятини при його використанні в продуктах швидкого приготування. *Теплофізика та Теплоенергетика*. 2024. 46 (4), 51–59 <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.6>.
16. Skrypnyk V., Semenov A., Ponomarenko B., Farisieiev A. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024, 32 (1), 89-98. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.285130>.
17. Demiray E., Tulek Y. Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*. 2014. 50 (6), 779–786. <https://dx.doi.org/10.1007/s00231-013-1286-9>.
18. Darıcı S., Şen S. Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat and Mass Transfer*. 2015. 51 (8), 1167–1176. <https://dx.doi.org/10.1007/s00231-014-1487-x>.
19. Khan A. M., Moradipour M., Obeidullah Md., Abdul Quader A. K. M. Heat and mass transport analysis of the drying of freshwater fishes by a forced 98 *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024, 32(1), 89-98 convective air-dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 2020. 44 (1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13574>.
20. Ahmat T., Bruneau D., Djongyang N. Drying kinetics of beef meat: Modeling by the isenthalpe mass flux method. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. 44 (1), 1–12. <https://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13647>.
21. Wojdyło A., Figiel A., Lech K., Nowicka P., Oszmianański J. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*. 2014. 7 (3), 829–841. <https://dx.doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>.
22. Šumić Z., Tepić A., Vidović S., Jokić S., Malbaša R. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. *Food Chemistry*. 2013. 136 (1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.102>.
23. Sriariyakul W., Swasdisevi T., Devahastin S., Soponronnarit S. Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation. *Food and Bioproducts Processing*, (2016). 100 (A), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.012>.
24. Cuccurullo G., Metallo A., Corona O., Cinquanta L. Comparing different processing methods in apple slice drying. Part 1. Performance of microwave, hot air and hybrid methods at constant temperatures. *Biosystems Engineering*. 2019. 188, 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.021>.
25. Wiktor A., Nowacka M., Dadan M., Rybak K., Lojkovski W., Chudoba T., Witrova-Rajchert D. The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color and microstructure of carrot. *Drying Technology*. 2016. 34 (11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>.
26. Dehghannya J., Kadkhodaei S., Heshmati M. K., Ghanbarzadeh B. Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave – hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. *Ultrasonics*, 2019. 96, 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.02.005>.
27. Celen S., Kahveci K. (2013). Microwave drying behavior of apple slices. *Process mechanical engineering*, 227(4), 264–272. <https://doi.org/10.1177/0954408912464729>.
28. Bhat Z. F., Morton J. D., Bekhit A. A., Kumar S., Bhat H. F. Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. 20 (5), 4511–4548. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12802>.

29. Berroug F., Bellaziz Y., Ouazzani N., Ait Nouh F., Hejjaj A., Boukhattem L., Idlimam A., El Mahmoudi H., Mandi L. Experimental and numerical investigations on conductive drying of phosphate washing waste clay. *Minerals*. 2021. 11 (5), 482. <https://doi.org/10.3390/min11050482>.
30. Jun Q., Parag A., Daris M. J., Rembo M. B., Maarten A. I. S. A systematic analysis on tomato powder quality prepared by four conductive drying technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2019. 54, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.013>.
31. Dexiao M., Guozhao J., Dong W., Aimin L. Reinforced contact between sludge and hot wall for enhancing conductive drying by applying external load: Heat and mass transfer analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. 154, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.021>
32. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків. Київ: ВД «Академперіодика». 2007. 162 с.
33. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Самойленко К. М., Слободянюк К. С. Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних поорошків. Монографія. Видавництво «Тропея». 2022. 148 с. ISBN 978-617-789-60-4.

References

1. Petrova, Zh., Sniezhkin Yu. (2018), Energy-efficient thermal technologies of functional raw materials processing. Monograph. Naukova Dumka, Kyiv. ISBN 978-966-00-1620-0. [in Ukrainian].
2. Chen. W., Chiu. H. T., Feng. Z., Maes. E., & Serventi. L. (2021). Effect of spray-drying and freeze-drying on the composition, physical properties, and sensory quality of pea processing water (Liluva). *Foods*, 10 (6), 1401.
3. Burger, T. G., Singh, I., Mayfield, C., Baumert, J. L., & Zhang, Y. (2022). The impact of spray drying conditions on the physicochemical and emulsification properties of pea protein isolate. *Lwt*, 153, 112495.
4. Ferreira. K. C., Bento. J. A. C., Caliari. M., Bassinello. P. Z., & Berrios. J. D. J. (2022). Dry bean proteins: Extraction methods, functionality, and application in products for human consumption. *Cereal Chemistry*, 99(1), 67–77. 5.1.
5. Petrova Zh.O., Sniezhkin Yu.F., Slobodianiuk K.S. Energy-saving heat technologies for obtaining soy based plant powders: monograph. Kyiv: PH Akademperiodyka. 2021. 96 p.
6. Argyropoulos D., J. Müller (2013). Convective drying and desorption isotherms of Shiitake (*Lentinula edodes*) mushroom. *Agricultural and Food Sciences*.
7. Argyropoulos. D., Khan. M.T. and Müller. J. (2010). Effect of drying temperature and pre-treatment on color and textural changes during convective air drying of *Boletus edulis* mushroom. 17th International Drying Symposium (IDS 2010). Magdeburg, Germany. 3-6 October 2010. 1404–1409.
8. Avdieieva L. Zhukotskvi E. Dekusha H. Ivanov S. (2021). Analiz isnuvuchvkh sposobiv ta osoblyvostev sushinnva hrvbiv shitake. [Analysis of the existing methods and specific features of drying shiitake mushrooms]. *Food science and technology*. 2021;15(3):94-107. <https://doi.org/10.15673/fst.v15i3.2118> [in Ukrainian].
9. Chandrasekaran. S., Ramanathan. S., Basak, T. (2013). Microwave food processing – A review. *Food Research International*, 52 (1), 243–261.
10. Dubkovetskv I. V., Malezhvk I. F., Baka T. V. (2016) Vvznachennva osnovnykh teplomasoobminnykh parametriv sushinnva kul'tyvovanykh hrvbiv drv riznykh sposobakh enerhopidvedennva. [Determination of the main heat and mass transfer parameters of drying cultivated mushrooms with different methods of energy supply]. *Scientific works of ONAHT*, 80 (1), C. 53–58. [in Ukrainian].
11. Hu L., Bi J., Jin X., Oiu Y. (2021). Study on the Rehydration Quality Improvement of shiitake Mushroom by Combined Drying Methods. *Foods*. 10. 769. <https://doi.org/10.3390/foods10040769>
12. Kantrong H., Tansakul A., Mittal GS. (2014) Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of food science and technology*, 51(12), pp. 3594–3608.
13. Hataichanok Kantrong & Ampawan Tansakul & Gauri S. Mittal (2014), Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *J Food Sci Technol.*, 51(12), pp. 3594–3608.
14. Xiao Yang, Yuyu Zhang, Yan Kong, Jing Zhao, Ying Sun & Mingquan Huang (2019) Comparative analysis of taste compounds in shiitake mushrooms processed by hot air drying and freeze drying. *International Journal of Food Properties*. 22 (1), pp. 1100–1111. 10.1080/10942912.2019.1628777.
15. Sniezhkin. Y. F., Petrov. P. I. (2024). Vvbir ratsional'noho rezhvmu sushinnva m'vasa kurvatvny drv voho vvkorstanni v produktakh shvvdvko ho drvhotuvannva. [Choosing a rational drying regime for chicken meat when using it in instant products]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46 (4), 51–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.6>.
16. Skrypnyk V., Semenov A., Ponomarenko B., Farisieiev A. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024, 32 (1), 89-98. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.285130>.

17. Demiray, E., Tulek, Y. (2014). Drying characteristics of garlic (*Allium sativum* L) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*, 50 (6), 779–786. <https://dx.doi.org/10.1007/s00231-013-1286-9>.
18. Darıcı, S., Şen, S. (2015). Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat and Mass Transfer*, 51 (8), 1167–1176. <https://dx.doi.org/10.1007/s00231-014-1487-x>.
19. Khan, A. M., Moradipour, M., Obeidullah, Md., Abdul Quader, A. K. M. (2020). Heat and mass transport analysis of the drying of freshwater fishes by a forced 98 Journal of Chemistry and Technologies, 2024, 32(1), 89-98 convective air-dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 44 (1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13574>.
20. Ahmat, T., Bruneau, D., Djongyang, N. (2021). Drying kinetics of beef meat: Modeling by the isenthalpe mass flux method. *Journal of Food Process Engineering*, 44 (1), 1–12. <https://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13647>.
21. Wojdyło, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., Oszmiański, J. (2014). Effect of convective and vacuum– microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 829–841. <https://dx.doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>.
22. Šumić, Z., Tepić, A., Vidović, S., Jokić, S., Malbaša, R. (2013). Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. *Food Chemistry*, 136(1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.102>.
23. Sriariyakul, W., Swasdisevi, T., Devahastin, S., Soponronnarit, S. (2016). Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation. *Food and Bioprocess Engineering*, 100 (A), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.012>.
24. Cuccurullo, G., Metallo, A., Corona, O., Cinquanta, L. (2019). Comparing different processing methods in apple slice drying. Part 1. Performance of microwave, hot air and hybrid methods at constant temperatures. *Biosystems Engineering*, 188, 331–344. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.021>.
25. Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkovski, W., Chudoba T., Witrova-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>.
26. Dehghannya, J., Kadkhodaei, S., Heshmati, M. K., Ghanbarzadeh, B. (2019). Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave – hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. *Ultrasonics*, 96, 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.02.005>.
27. Celen, S., Kahveci, K. (2013). Microwave drying behavior of apple slices. *Process mechanical engineering*, 227 (4), 264–272. <https://doi.org/10.1177/0954408912464729>.
28. Bhat, Z. F., Morton, J. D., Bekhit, A. A., Kumar, S., Bhat, H. F. (2021). Thermal processing implications on the digestibility of meat, fish and seafood proteins. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 4511–4548. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12802>.
29. Berroug, F., Bellaziz, Y., Ouazzani, N., Ait Nouh, F., Hejjaj, A., Boukhattem, L., Idlimam, A., El Mahmoudi, H., Mandi, L. (2021). Experimental and numerical investigations on conductive drying of phosphate washing waste clay. *Minerals*, 11 (5), 482. <https://doi.org/10.3390/min11050482>.
30. Jun, Q., Parag, A., Daris, M. J., Rembo, M. B., Maarten, A. I. S. (2019). A systematic analysis on tomato powder quality prepared by four conductive drying technologies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.013>.
31. Dexiao, M., Guozhao, J., Dong, W., Aimin, L. (2021). Reinforced contact between sludge and hot wall for enhancing conductive drying by applying external load: Heat and mass transfer analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 154, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.021>.
32. Sniezhkin, Yu. F., Petrova, Zh. O. (2007). *Teplomasoobminni protsesy pid chas oderzhannia karotynovmisnykh poroshkiv* [Heat and mass exchange processes during the production of carotene-containing powders. Monograph]. Kyiv: VD «Akadempriodyka». 162 p. [in Ukrainian].
33. Sniezhkin, Yu. F., Petrova, Zh. O., Samoilenko, K. M., Slobodianiuk, K. S. (2022). *Teplomasoobminni protsesy otrymannia kombinovanykh funktsionalnykh poroshkiv* [Heat and mass exchange processes of obtaining combined functional powders. Monograph]. Vydavnytstvo «Tropaea». 148 p. ISBN 978-617-789-60-4. [in Ukrainian].