

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Самойленко Катерина Миколаївна

УДК 664.8.047

**НАУКОВІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ БІЛКОВОВМІСНИХ ПРОДУКТІВ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Петрова Жанна Олександрівна,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
головний науковий співробітник відділу
Тепломасопереносу в теплотехнологіях

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Паламарчук Ігор Павлович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України, професор
кафедри процесів і обладнання переробки
продукції АПК

доктор фізико-математичних наук, професор
Гаврюшенко Дмитро Анатолійович
Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, завідувач кафедри
молекулярної фізики фізичного факультету

доктор технічних наук, доцент
Гузьова Ірина Олександрівна,
Національний університет «Львівська
політехніка», доцент кафедри хімічної
інженерії

Захист відбудеться «12» травня 2026 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. М. Капніст, 2а, к. 135.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057 м. Київ, вул. М. Капніст, 2а та на сайті Інституту <https://ittf.kiev.ua/specializovani-vcheni-radi-2023/>

Реферат розісланий «10» квітня 2026 р.

в.о. Вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук, професор,
чл.-кор. НАН України



Андрій АВРАМЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Враховуючи загальну тенденцію до збільшення кількості спожитої енергії в усьому світі, вартість її безперервно підвищується та зростає дефіцит. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв, оскільки додаткова складність в тому, що виробництво та переробка сільськогосподарської продукції відбувається в умовах підвищеного споживання газу та інших енергоносіїв з низьким коефіцієнтом корисної дії і великими втратами сировини при переробці.

Шляхи зниження питомих енерговитрат під час сушіння, розроблення способів інтенсифікації процесу залежно від певного методу та об'єкту зневоднення, теплотехнології і сушильного обладнання ґрунтуються на узагальненні закономірностей тепломасообміну і є предметом теоретичних й експериментальних досліджень багатьох вітчизняних та іноземних вчених і достатньо широко висвітлено в наукових працях А.А. Долінського, Ю.Ф. Снежкіна, Ж.О. Петрової, Л.Ю. Авдєєвої, В.М. Пазюка, К.Д. Малецької, О.Г. Бурдо, В.М. Атаманюка, В.О. Потапова, М.І. Погожих, Паламарчука І.П. та інших.

Процеси сушіння присутні майже в усіх галузях промисловості. Питання енергоефективності способів сушіння є одним із найактуальніших напрямків дослідження в сучасній науці. Сушіння вологих матеріалів є одночасно теплотехнічним та технологічним процесом, під час якого змінюються технологічні та біохімічні властивості матеріалу.

Основним із способів продовжити термін придатності білкововмісної сировини є сушіння. Це значно збільшує термін споживання, з подальшим довготривалим зберіганням. Одним із вагомих недоліків свіжої сировини, особливо м'яса та культивованих грибів, є короткий термін зберігання. Наприклад, для грибів 1-3 дні (температура навколишнього середовища) і 3-5 днів (4 °С) після збору врожаю.

У більшості технологій загальні витрати на процес сушіння складають 50-70 %. Тому для вирішення проблеми енергоефективності теплотехнологій необхідно вирішувати, перш за все, ефективність процесів зневоднення.

Одним із найпоширеніших способів є конвективне сушіння. Недоліком є те, що при термолабільній температурі теплоносія процес є тривалим, а при підвищеній температурі сушіння відбуваються негативні зміни для біологічно активних речовин та, відповідно, якості готової продукції. Наприклад, для отримання сушених грибів з кінцевим вмістом вологи 4–5% тривалість сушіння матеріалу може становити 10–12 год.

Широкого розповсюдження набули технології, до яких належать мікрохвильово-вакуумне, сублімаційне сушіння та деякі з новітніх гібридних технологій, такі як холодна плазма з інфрачервоним сушінням.

Однак гібридні технології, такі як сублімаційно-інфрачервоне та мікрохвильово-вакуумне-конвективне сушіння дали неоднозначні результати якісних та енергетичних характеристик, тому це питання потребує додаткових досліджень та розробки нових, але простих, енергоефективних та надійних

методів сушіння. Варто відмітити, що ці комбіновані методи сушіння є дорого вартісними.

На сьогоднішній день в Україні недостатньо виробництва з переробки білкововмісної сировини, що дозволяє зберегти якість нативного матеріалу.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематик науково-дослідних робіт відділу «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» Інституту технічної теплофізики НАН України. Базовими науково-дослідними роботами для підготовки і подання даної дисертаційної роботи були держбюджетні прикладні та фундаментальні дослідження в рамках наступних тем:

– 1.7.1.879 «Наукові засади підвищення енергоефективності теплотехнологій при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів» (2017-2021 рр., РК № 0117U002650).

– 1.7.1.897 «Інтенсифікація тепломасопереносу при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та розроблення енергоефективного сушильного обладнання» (2020-2024 рр., РК № 0120U103352, ОК № 0225U003159).

– 52-07/03-2021 «Підвищення енергоефективності тепломасообмінних процесів при зневодненні термолабільних колоїдних капілярно-пористих матеріалів в інноваційних теплонасосних сушарках» (2021-2022 рр., РК № 0121U111865, ОК № 0223U000132, 0221U106933).

– 1.7.1.910 «Інтенсифікація тепломасообмінних процесів при зневодненні та термообробці дисперсних матеріалів» (2025-2029 рр., РК № 0125U003694).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних засад та експериментальне підтвердження комплексної та ефективної переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження, тепломасообмінні процеси та створення енергоефективних теплотехнологій з отриманням харчових порошоків високої біологічної цінності, які є основою продуктів харчування для використання в екстремальних умовах населення, військовослужбовців та спортсменів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан наукових та практичних розробок отримання харчових порошоків із білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;

- встановити теплофізичні параметри попередньої підготовки до сушіння білкововмісної сировини з метою зменшення енерговитрат на процес при збереженні біологічно активних речовин;

- дослідити тепломасообмін зневоднення білкововмісних матеріалів з урахуванням властивостей сировини і режимів сушіння;

- розробити енергоефективні режими зневоднення білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;

- визначити теплофізичні характеристики, теплоту випаровування і теплоємність та фізико-хімічні властивості білкововмісних порошоків;

- розрахувати залежність критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння;

- виконати чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів;

- дослідити сорбційні властивості та активність води висушеної білкововмісної сировини;
- визначити відновлення харчових порошків (гранул, кубиків, пластин, порошків) білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження від режимних параметрів сушіння, форми матеріалу та температури відновлення;
- розробити енергозберігаючі теплотехнології для отримання гранульованого м'яса та грибного порошку з білкововмісної сировини;
- розробити теплотехнологію сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі м'яса, грибів, моркви та селери.

Об'єкт досліджень – тепломасообмінні процеси при розробці енергоефективної теплотехнології отримання сухого м'яса, грибного порошку, та гранульованого м'ясного продукту.

Предмет досліджень – теплові режими та кінетика сушіння м'яса свинини, яловичини та культивованих грибів ерінги, шийтаке, глива, печериця і їх теплофізичні параметри після зневоднення.

Методи дослідження. В роботі використано методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів сушіння: часу проведення досліду, температури теплоносія та зменшення маси матеріалу за допомогою автоматизованих систем збору та обробки інформації в розроблених програмах "Sooshka" на спеціально спроектованих і виготовлених установках. Обробка експериментальних даних виконувалась за допомогою комп'ютерної техніки і прикладних програмах Excel. Для оцінки якості сушеного матеріалу використані стандартні методи дослідження визначення якісних характеристик, регідратійних та сорбційних властивостей, хімічного складу. Розрахунки теоретичного дослідження тепломасопереносу здійснювалися засобами програмування. Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів виражена у науковому обґрунтуванні теорії тепломасообміну під час зневоднення білкововмісної харчової сировини при тепломасоперенесенні в процесі сушіння, а саме:

- аналітичний аналіз методів підготовки та сушіння білкововмісної сировини дав змогу отримати нові рішення для вирішення проблем тепломасообміну в процесах сушіння;
- обґрунтовано вплив попередньої підготовки білкововмісної сировини до сушіння на тепло- та вологообмін в матеріалі і встановлені теплофізичні характеристики, які дозволили зменшити енерговитрати на 15 – 20 % із збереженням якості кінцевої продукції;
- встановлено залежність основних характеристик процесу сушіння за розробленими режимами при зневодненні білкововмісної сировини із зменшенням енерговитрат та максимальним збереженням біологічно активних речовин;
- *вперше* було визначено теплоту випаровування культивованих грибів, при цьому отримані під час сушіння значення питомих витрат теплоти на випаровування були представлені у вигляді залежності від поточного значення

відносної вологості зразків, які показали складність випаровування з матеріалу у порівнянні з випаровуванням чистої води;

- *вперше* було визначено теплоємність культивованих грибів в діапазоні температур 32,5 – 87,5 С, експериментальні та теоретичні значення яких співпадають;

- встановлено залежність критерію оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність розроблених режимів;

- за результатами чисельного моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів отримано графіки залежностей температури поверхні тепломасообміну та маси вологи від часу в зразку в процесі його сушіння;

- досліджено регідратаційні властивості сухих білкововмісних продуктів, отриманих при різних режимах сушіння та встановлено ефекти впливу режимів сушіння на відновлюваність отриманого продукту;

- досліджено енергоефективний процес сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці, визначено енергетичні витрати на процес, які підтвердили доцільність вибраних режимів;

- визначено активність води для білкововмісної сировини як критерію збереження якості сировини;

- *вперше* визначено рівноважну вологість й оптимальні умови зберігання білкововмісних продуктів.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено енергоефективні теплотехнології виробництва гранульованого м'ясного порошку з м'яса свинини, яловичини; грибного порошку з культивованих грибів шиїтаке, ерінгів, печериць та гливи звичайної та сушеного гранульованого м'ясного продукту.

- розроблено дослідно-промислові лінії отримання сухого продукту швидкого приготування із підвищеним вмістом білків;

- практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень до науково-дослідницького Інституту продовольчих ресурсів НААН для впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку;

- результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес НТУУ КПІ для підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування»;

- на пріоритети нових способів подані патенти:

- заявка на Патент України на Винахід № а202405902 від 12.12.2024 р. «Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту»;

- заявка на Патент України на Винахід № а202406176 від 24.12.2024 р. «Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке»,

- заявка на Патент України на Винахід № а202500756 від 20.02.2025р «Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування».

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні основної ідеї і теми дисертації, у формулюванні та доказі

наукових положень, постановці та проведенні експериментальних досліджень з підготовки сировини до сушіння, тепломасообміну при зневодненні та отриманні наукових результатів, вказаних у дисертації, визначенні теплофізичних характеристик теплоти випаровування, теплоємності білкововмісної сировини, у розрахованій залежності критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння, розрахованому чисельному моделюванню процесу тепломасопереносу при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів, дослідженні сорбційних, регіратаційних властивостей, у розробці енергозберігаючої теплотехнології для отримання порошків з білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження та сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі білкововмісних порошків.

Обговорення, аналіз та узагальнення результатів досліджень проведені з науковим консультантом д.т.н., професором, чл.-кор. НАН України Петровою Ж.О.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертації та її результати доповідались та обговорювались на XXI міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021), XXIX всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництва підприємств будівельних матеріалів" КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021), XIX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2022), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2022), XXIII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ, 2022), Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Seoul-Vinnytsia: Case Co., Ltd.& European Scientific Platform (Seoul-Vinnytsia, 2023), XIII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (2023), Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale. (Paris-Vinnytsia, 2025), The international conference food for life "Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy"(Київ, 2025), 5th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Lviv, 2025), XVI міжнародній онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2025), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» (Київ, 2025), The 2nd International scientific and practical conference "Scientific development in a changing world" SPC "Sci-conf.com.ua" (Lviv, 2025), 4th International scientific and practical conference "European science and innovation congress" (Barcelona, 2026).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 41 науковій праці, з яких 8 наукових статей, що входять до наукометричних баз даних Scopus, Web of Science (з них 1 в журналі з квантилем Q3); 10 наукових статей у фахових виданнях України; 2 монографії; 3 колективні монографії (1 з

них розділ колективної монографії, що входить до наукометричної бази даних Scopus), 3 заявки на патент на винахід України; 15 матеріалів тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 209 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 335 сторінок, у тому числі 243 сторінки основного тексту, що містить 160 рисунків, 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, яка вирішується у дисертаційній роботі, сформульовано мету і задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо особистого внеску здобувача та апробації результатів досліджень.

У **першому розділі «Літературний огляд стану, способів та методів зневоднення білкововмісної сировини»** виконано аналіз літературних джерел, що стосується основних аспектів щодо перспективи виробництва білкововмісних харчових порошків з м'яса свинини, яловичини та культивованих грибів ерінги, шіїтаке, глива, печериця звичайна; особливостей розробки підготовки сировини до зневоднення, проаналізовано процеси тепломасообміну при сушінні білкововмісної сировини з точки зору енергоощадності процесу та збереження біологічно активних речовин нативної сировини.

У **другому розділі «Характеристика об'єктів та методики проведення досліджень»** зроблено вибір об'єктів дослідження харчової білкововмісної сировини, яка виробляється в Україні та є перспективною для виробництва білкововмісних продуктів, наведено її характеристики. Для теоретичних та експериментальних досліджень було обрано: м'ясна сировина – свинина, яловичина, культивовані гриби – ерінги, шіїтаке, глива, печериця звичайна. Наведено методики проведення експериментальних досліджень процесу зневоднення, визначення теплофізичних, сорбційних, регідраційних, якісних властивостей білкововмісної сировини. Наведено опис та принцип дії експериментального конвективного стенду, приладу ДМКИ-01, диференціального сканувального мікрокалориметра ДСМ-2М, молоткової дробарки, установки для дослідження дисперсного складу рослинної сировини, приладу Aqualab3TE.

У **третьому розділі «Тепломасообмінні процеси при сушінні білкововмісної сировини»** проведено аналітичні та експериментальні дослідження волого-теплової обробки білкововмісної сировини, які показали можливість підвищення їх ефективності. Запропонований спосіб попередньої обробки білкововмісної сировини дав змогу зменшити енерговитрати під час сушіння. Представлено підготовку білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження (м'яса, культивованих грибів, розробленого гранульованого м'ясного продукту).



Рис. 1. Попередня підготовка м'ясної сировини (свинина, яловичина) до сушіння

На властивості отриманої продукції впливає попередня підготовка сировини (нарізання, тепла обробка). Теплова обробка м'яса доводить продукт до споживчої якості, зменшує мікробне забруднення.

В даній роботі досліджено білково-

вмісну сировину тваринного походження на прикладі свинини та яловичини. М'ясо свинини, яловичини (рис. 1) промивали під проточною водою, нарізали на шматки 10x12 см та піддавали тепловій обробці протягом 20 хв. Після цього нарізали на кубики формою 5x5x5 мм, а для отримання гранул використовували м'ясорубка (вовчок) з діаметром сітки 5 мм, через який пропускали відварене м'ясо, в результаті чого були отримані гранули діаметром 5 мм.

Дані для побудови кривих сушіння були отримані на експериментальному стенді з автоматичним збором та обробкою інформації. Кінетику сушіння м'ясної сировини досліджували у вигляді гранул та кубиків. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння м'яса свинини у вигляді гранул представлено на рис. 2.а при конвективному сушінні 55°C, 80°C та комбінованому інфрачервоно-конвективному 3800 Вт/м² + 55°C. З рисунку видно, що тривалість при комбінованому режимі для гранул у 1,7 разів є меншою у порівнянні із режимом 55°C. Інтенсивність підтверджена і графіками швидкості (рис. 2.б). Найнижча швидкість є для зразків за режиму 55°C, яка становить 1,7 %/хв, а найвища - для комбінованого способу - 3,15 %/хв.

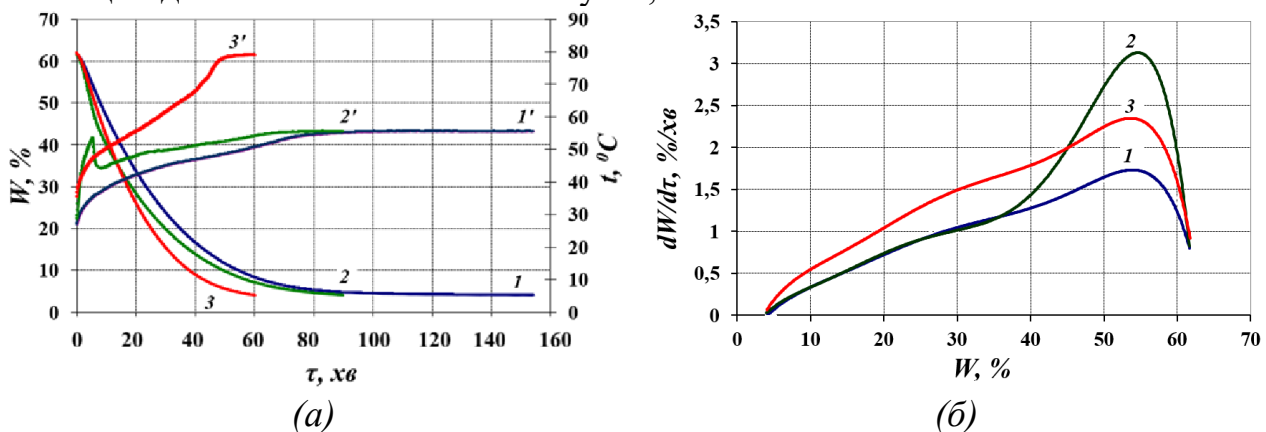


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння м'яса свинини (гранули $d=5$ мм, маса 0,5 г) $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1,1' - 55°C; 2,2' - 3800 Вт/м² + 55°C; 3,3' - 80°C

На рис. 3 показані криві сушіння м'яса свинини у вигляді кубиків. При цьому спостерігаємо, що при сушінні кубиків за режиму 55°C тривалість становить 200 хв, а за комбінованого режиму - 355 хв, тобто у 1,8 разів довше

(рис. 3.а). Ймовірно, це відбувається тому, що при утворенні гранул була порушена структура білків м'яса, в той час як у кубиках цільного м'яса вона не порушувалась і тому випаровування вологи з гранул відбувається краще, а від цього і інтенсивність процесу зневоднення вища.

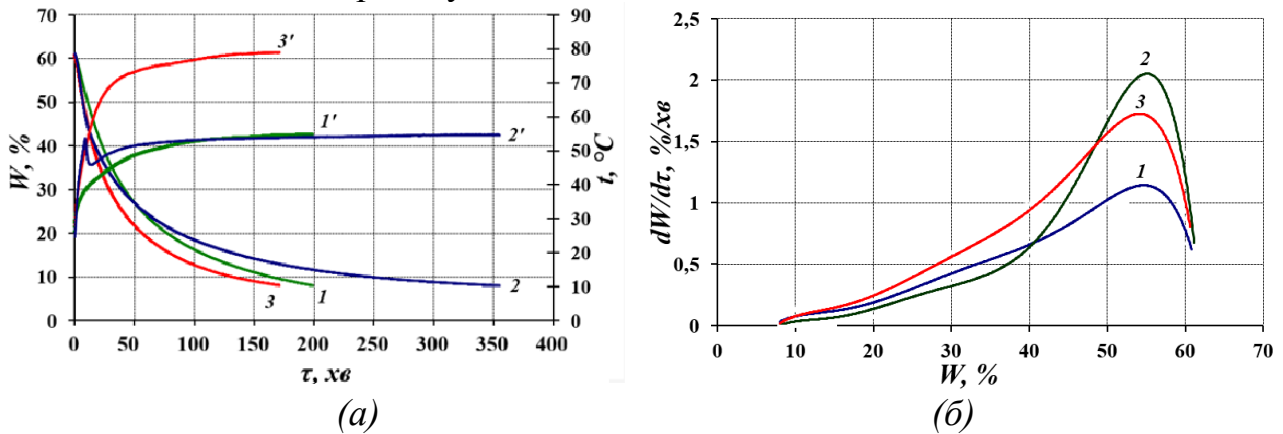


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння м'яса свинини (кубики 5x5x5 мм, маса 0,5 г) $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1,1' - 55°C; 2,2' – 3800 Вт/м² + 55°C; 3,3' – 80°C

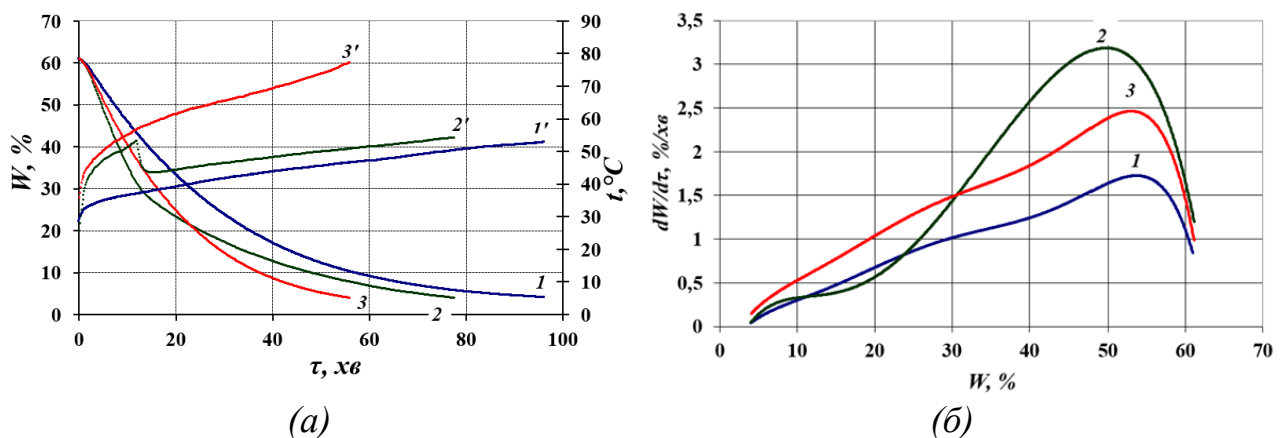


Рис. 4. Вплив температури теплоносія на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння м'яса яловичини (гранули) $d=5$ мм, маса 0,5 г, $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1,1' - 55°C; 2,2' – 3800 Вт/м² + 55°C; 3,3' – 80°C

Дослідження кінетики зневоднення м'яса яловичини проводили лише для гранул, оскільки сушити м'ясну сировину у вигляді кубиків енергетично недоцільно, як показали результати досліджень м'яса свинини. На рис. 4 видно, що тривалість сушіння при розробленому інфрачервоно-конвективному режимі 3800 Вт/м²+ 55°C є меншою в 1,25 рази у порівнянні із режимом 55°C.

Отримані ефективні режими для сушіння м'яса, використовували і при дослідженні кінетики сушіння культивованих грибів, змінюючи лише форму зразка. Досліджували вплив температури теплоносія на тривалість процесу при конвективному сушінні грибів ерінги при 60°C, 70°C, 100°C. Як видно з рис. 5, чим вища температура теплоносія, тим менша тривалість зневоднення та більша швидкість сушіння. Тривалість процесу при 100°C становить 75 хв та відбувається у 3,2 рази швидше у порівнянні з режимом 60°C. Однак, використання теплоносія з високою температурою з метою інтенсифікації процесу обмежується якісними показниками матеріалу. Тому в подальших

дослідженнях використовували температуру теплоносія, яка не перевищує критичну для білкововмісних матеріалів.

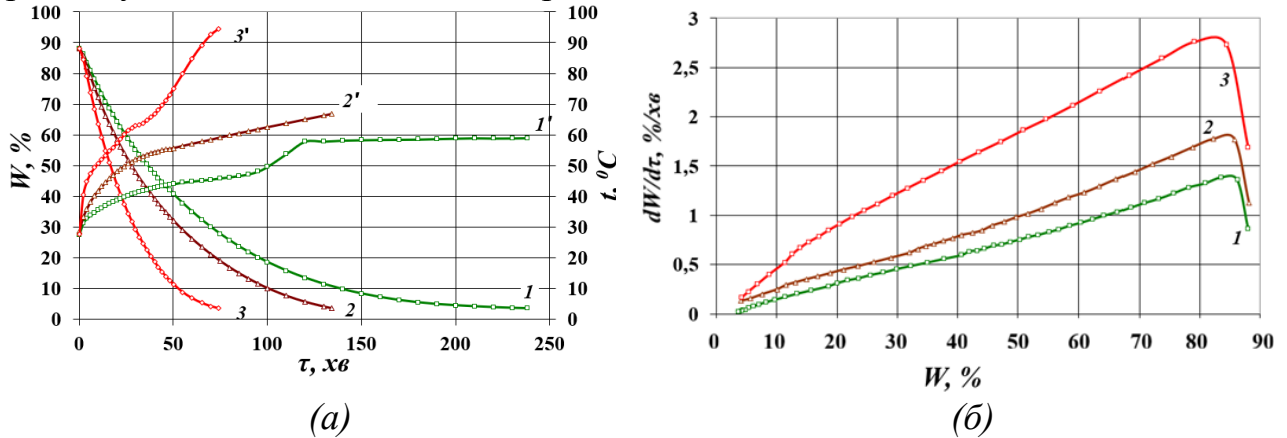


Рис. 5. Вплив температури на тривалість (а) та швидкість (б) процесу при конвективному сушінні грибів ерінги 20x10x10 мм, $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.: 1 – 60°C; 2 - 70°C; 3 – 100°C

На початковій стадії прогріву температура поверхні матеріалу підвищується, швидко досягаючи температури мокрого термометра, тому перший період практично не прослідковується. В цей період відбувається найбільш інтенсивна вологовіддача і вся теплота, яка передається матеріалу, витрачається на випаровування води і температура його рівна температурі рідини, що випаровується.

При дослідженні кінетики сушіння культивованих грибів крім комбінованого досліджували конвективний двоступеневий режим шляхом зниження температури теплоносія від 100°C до 60°C під час процесу зневоднення.

На рис. 6 представлено порівняльну характеристику конвективного двоступеневого та комбінованого режимів сушіння культивованих грибів ерінги з метою визначення найбільш оптимальних. На початку процесу конвективного двоступеневого сушіння при вологості матеріалу 85 - 88 %, можливо використання теплоносія із температурою 100°C. При досягненні матеріалом температури 48 - 50°C (на 20 хв експерименту), знижували теплоносії до 60°C. Проте температура матеріалу продовжувала зростати до 53°C, тому що відбувається поступове охолодження.

При комбінованому способі процес сушіння починається із одночасної подачі теплоти від двох енергоносіїв, а саме інфрачервоне випромінювання 3800 Вт/м² та конвективне 60°C. Як видно з кривих 2, 2' (рис. 6.a), на початку процесу спостерігається стрімке нагрівання матеріалу до 50°C за 20 хв. З метою запобігання перегріву матеріалу та збереження біологічно активних речовин, в даній точці вимикали один із теплоносіїв (ІЧВ 3800 Вт/м²). Спостерігаємо різке зниження температури матеріалу до 43°C із подальшим поступовим нагрівом до кінця процесу не вище 55°C. При комбінованому способі тривалість становить лише 160 хв, причому процес інтенсифікується в 1,5 рази у порівнянні із конвективним режимом 60°C. Якщо порівнювати ці два способи по тривалості процесу із термолабільним 60°C, то комбінований має тривалість в 1,5 рази, а конвективний двоступеневий - у 1,7 рази менше.

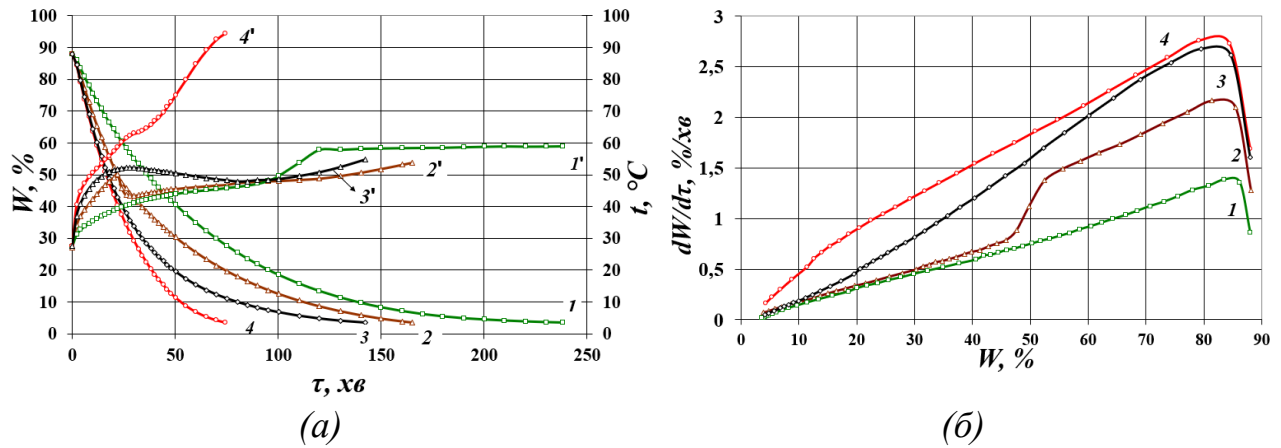


Рис. 6. Вплив режимів на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння грибів ерінги $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п:

1, 1' – 60°C ; 2, 2' – $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$; 3, 3' – $100/60^\circ\text{C}$; 4, 4' – 100°C

На рис. 6.б представлені криві швидкості сушіння грибів ерінги, з яких видно, що найнижча швидкість у режиму 60°C , яка становить $1,4 \text{ \%}/\text{хв}$, найвища - при температурі теплоносія 100°C – $2,8 \text{ \%}/\text{хв}$, для конвективного двоступеневого режиму швидкість сушіння є досить високою (майже такою, як і для режиму 100°C) та становить приблизно $2,7 \text{ \%}/\text{хв}$, і для комбінованого – $2,2 \text{ \%}/\text{хв}$.

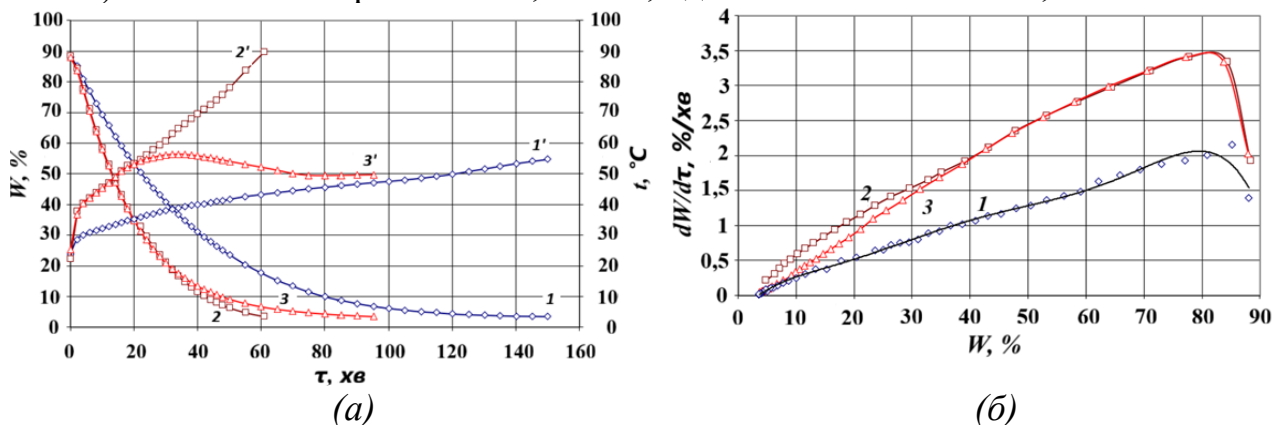


Рис. 7. Вплив режимів на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння культивованих грибів шиїтаке $\delta = 10$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п:

1, 1' – 60°C ; 2, 2' - 100°C ; 3, 3' – $100/60^\circ\text{C}$

На рисунку 7.а представлені криві сушіння зміни вологості матеріалу в часі та температурні криві сушіння культивованих грибів шиїтаке. Зміна вологості грибів шиїтаке при температурі теплоносія 60°C відбувається протягом 156 хв. При цьому, як видно з температурної кривої 1', матеріал рівномірно прогрівається протягом всього періоду сушіння і лише в кінці температура матеріалу становить 55°C .

Крива зміни вологості 2 показує, що процес інтенсифікується при температурі теплоносія 100°C і триває всього 60 хв. Температурна крива 2' вказує на інтенсивний прогрів матеріалу та на 55 хв процесу температура матеріалу різко підвищується і становить на 60 хв – 90°C . Це призводить до денатурації білків, утворення меланоїдинових реакцій, руйнуванню вітамінів та інших небажаних процесів, хоча при цьому найкоротша тривалість процесу. Виходячи з цих досліджень, доцільно на початку процесу, коли вологість грибів висока,

збільшити температуру теплоносія до 100°C , не доводячи до високого прогріву матеріалу. Криві зміни вологості 3 та температури 3' показують, що через 20 хв температура матеріалу становить 50°C і доцільно знижувати температуру теплоносія до 60°C . В даному випадку дещо уповільнюється процес і його тривалість становить 97 хв, що значно більша за режим 100°C , проте значно менша, ніж при температурі 60°C . Виходячи з цих даних, дослідження сушіння необхідно проводити ступеневим режимом за температури теплоносія $100/60^{\circ}\text{C}$ та температури матеріалу 60°C .

На кривих швидкості сушіння (рис. 7.б) видно, що швидкість сушіння як при температурі теплоносія 100°C так при $100/60^{\circ}\text{C}$ становить $3,5\ \%/хв$. Температура 60°C уповільнює швидкість сушіння. Крива швидкості ступеневого режиму, як і на графіку зміни вологовмісту збільшується швидкість сушіння у порівнянні із 60°C . Як видно, при конвективному двоступеневому режимі $100/60^{\circ}\text{C}$, процес сушіння триває в 1,6 рази швидше у порівнянні із режимом 60°C , та швидкість сушіння також є більшою та становить $3,5\ \%/хв$.

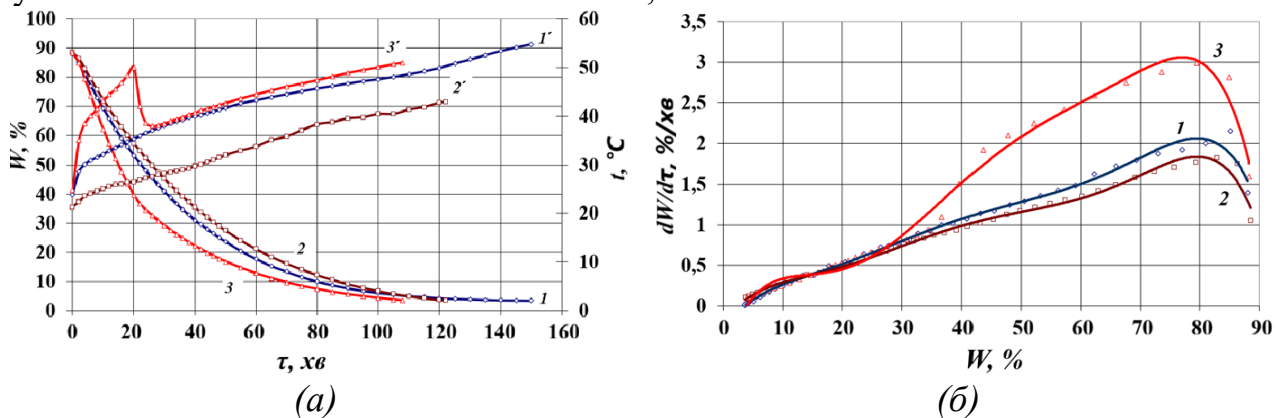


Рис. 8. Вплив режимів на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння грибів шийтаке в залежності від способу зневоднення $\delta = 10\ \text{мм}$, $V = 3\ \text{м/с}$, $d = 10\ \text{г/кг}$ с.п:

1,1' – 60°C ; 2,2' – $3800\ \text{Вт/м}^2$ (при 20°C); 3,3' – $3800\ \text{Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$

Як видно з рис. 8.а, тривалість сушіння при ГЧВ становить 122 хв, що є на 19 % швидше, ніж при конвективному режимі 60°C . Крива 3,3' показує комбіноване сушіння. При досягненні досліджуванним зразком температури 50°C на 20-ій хвилині експерименту, один із теплоносіїв (ГЧВ $3800\ \text{Вт/м}^2$) було вимкнено, як і у випадку дослідження грибів ерінги. При цьому спостерігається різке зниження температури матеріалу до 39°C із подальшим поступовим нагрівом. Комбіноване сушіння $3800\ \text{Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$ триває 110 хв та при цьому відбувається інтенсифікація процесу сушіння у 1,4 рази у порівнянні із режимом 60°C . Швидкість сушіння при конвективному режимі 60°C становить $2,0\ \%/хв$, при ГЧВ $3800\ \text{Вт/м}^2$ – $1,8\ \%/хв$, при комбінованому $3800\ \text{Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$ є найбільшою – $3\ \%/хв$ (рис. 8.б).

На рис. 9 представлено порівняльну характеристику тривалості сушіння культивованих грибів при запропонованих ефективних режимах зневоднення. Не дивлячись на майже однакову початкову вологість, тривалість процесу для всіх грибів різна. Найшвидше піддаються зневодненню культивовані гриби глива звичайна 62 та 64 хв для конвективного двоступеневого та комбінованого інфрачервоно-конвективного режимів відповідно. На другому місці шийтаке із

тривалістю 97 хв та 115 хв. Гриби ерінги мають найдовшу тривалість 145 хв та 160 хв при ефективних режимах у порівнянні з іншими культивованими грибами. Це залежить від хімічного складу кожного виду грибів, умов їх вирощування та зберігання тощо.

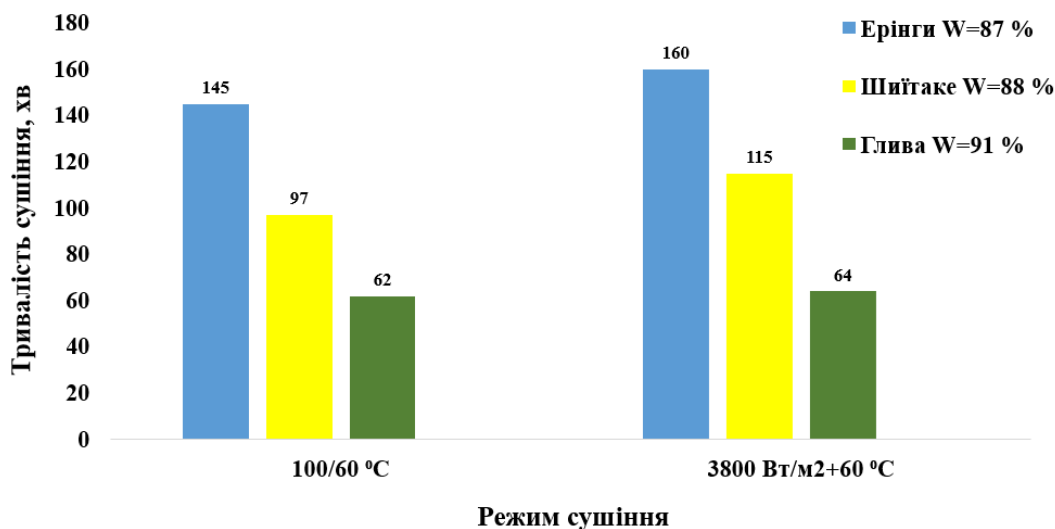


Рис. 9. Порівняльна характеристика тривалості сушіння культивованих грибів при ефективних режимах зневоднення

На основі проведених експериментальних досліджень кінетики сушіння культивованих грибів та м'ясної сировини було розроблено сушений гранульований м'ясний продукт з підвищеним вмістом білку. У складі продукту присутня білкововмісна сировина як тваринного так і рослинного походження, а також овочі. Вдалося об'єднати ці інгредієнти таким чином, щоб утворився смачний корисний продукт із високим вмістом білку та достатньою кількістю харчових волокон.

Вперше було розроблено спосіб одержання сушеного м'ясного гранульованого продукту, який здійснюється наступним чином. Гриби, моркву, селеру інспектують, миють, очищають та нарізають на пластини 3 x 4 см. Заливають холодною водою. Доводять до кипіння, проварюють 1,5 - 2 хв. Забирають з овочевого відвару, охолоджують. М'ясну сировину очищують від жиру та плівки, нарізають на шматочки 10x12 см, занурюють в овочевий відвар у співвідношенні 2:1, варять протягом 20 хв та виймають з окропу, охолоджують, змішують м'ясо, гриби та рослинну сировину у такому співвідношенні компонентів: 60 % відвареного м'яса, 20% грибів, 10% моркви і 10% селери, одержану суміш пропускають через подрібнювач та формують гранули, розміром 5 мм, які сушать за температури матеріалу 55 - 56 °C до кінцевої вологості та охолоджують.

За рахунок такого співвідношення та оптимальної температури зневоднення, підвищується відновлюваність сушеного продукту, при цьому при відновленні можна застосовувати воду температурою 45 – 95 °C, що дає ширший діапазон у їх використанні.

Одержані сушені гранули м'яса з грибами та рослинною сировиною мають відмінні органолептичні та технологічні показники, що забезпечує їх широке

використання як самостійного продукту, а також як добавка до харчових концентратів.

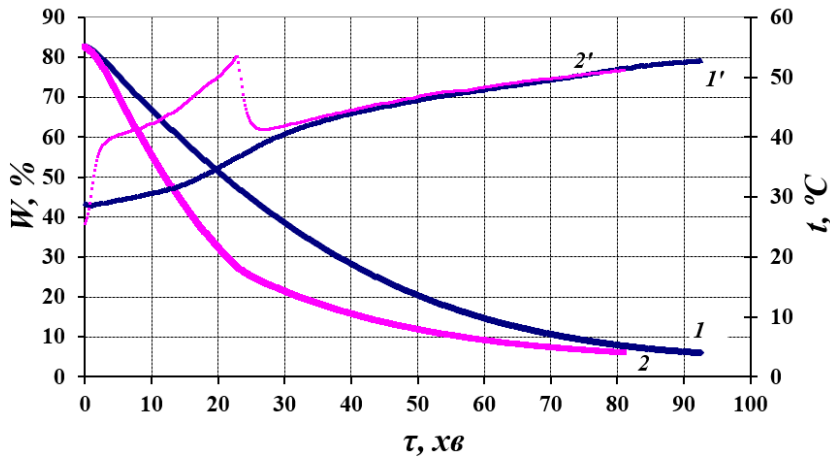


Рис. 10. Зміна вологості гранульованого м'ясного продукту (м'ясо 60 %, гриби 20 %, селера 10 %, морква 10 %) в залежності від режиму зневоднення:

1, 1' – 55 °C; 2, 2' - 3800 Вт/м²+ 55 °C

конвективному способі є 83 хв.

Розробка теплотехнології сушіння грибів потребує, в свою чергу, глибокого вивчення механізму та енергетики процесу їх зневоднення, який має певні особливості та відмінності порівняно із зневодненням рослинної сировини чи продукції тваринництва. Витрати теплоти на випаровування вологи з тканин гриба печериця звичайна в процесі їх конвективно-кондуктивного сушіння та зміну їх питомої теплоємності в технологічно значимому діапазоні температур і вологостей було вперше експериментально визначено за допомогою диференціального мікрокалориметра випаровування ДМКИ-01. Він поєднує в собі можливості калориметрії та термогравиметрії та був розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України саме для такого роду досліджень.

Для експерименту з визначення теплоти випаровування використали тонкий (товщиною ~ 1 мм) зріз тканин плодового тіла гриба діаметром до 40 мм. Сушіння проводили при температурах 40 - 80°C, швидкості повітря 0,8 см/с та його вологовмісті 10 г/кг. Реєстрація теплового потоку і зміни маси зразка в процесі сушіння здійснювалась безперервно до моменту досягнення зразком рівноважної вологості. Для експерименту з визначення питомої теплоємності використали нарізку тканин 1x1x1см. Для отримання необхідного спектру вологості зразки попередньо конвективно підсушували при температурі 60°C. Масу сухих речовин визначали після дослідів, шляхом досушування зразків до постійної маси при температурі 105°C.

Результати експериментального визначення питомих витрат теплоти на випаровування вологи з тканин гриба (рис.11) показали, що вони тільки на самому початку сушіння більш-менш наближуються до табличного значення теплоти випаровування води з вільної поверхні (2406, 2382, 2358, 2333 та 2308 кДж/кг при 40, 50, 60, 70 та 80°C відповідно, згідно довідникових даних).

На рис. 10 показана зміна вологості гранульованого м'ясного продукту (м'ясо 60 %, гриби 20 %, селера 10 %, морква 10 %) в залежності від режиму зневоднення. Як видно, криві мають характер схожий до кривих сушіння м'яса, оскільки саме цього інгредієнту у складі гранульованого продукту найбільше, тривалість при комбінованому інфрачерво-

Момент самого початку випаровування зафіксувати не вдалося через накладання на нього процесу прогріву зразків до температури сушіння. Проте, майже відразу після прогріву спостерігається зростання витрат теплоти на випаровування, яке

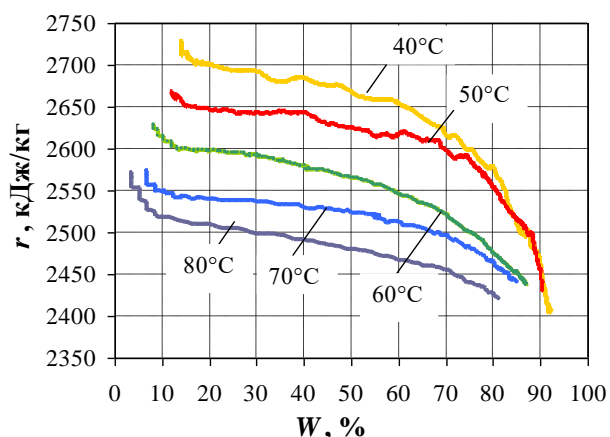
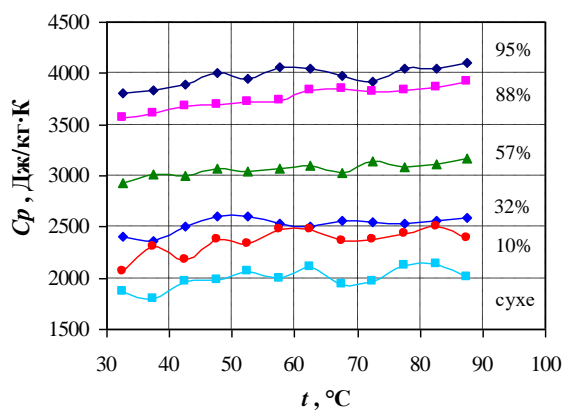


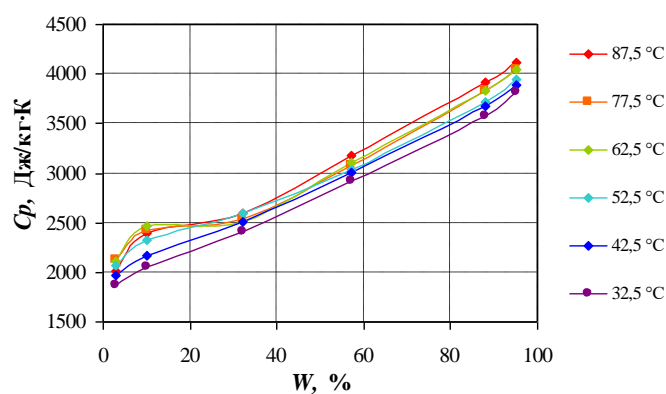
Рис. 11. Залежність питомих витрат теплоти на випаровування води з тканин плодового тіла гриба печериці звичайної від їх відносної вологості під час сушіння при різних температурах

за межу їх гігроскопічної вологості.

Результати експериментального визначення теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця звичайна з вологістю $W = 0 - 95\%$ відн. в діапазоні температур $t = 32,5 - 87,5^\circ\text{C}$ представлено на рис.12.



а)



б)

Рис. 12. Залежність теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця звичайна від температури при різній вологості зразків (а) та від вологості зразків при різній температурі (б)

Сімейство кривих зміни теплоємності зі зміною вологості тканин плодового тіла, отримані при різній температурі (рис.12б), можна апроксимувати лінійними рівняннями загального вигляду (табл. 1):

$$C_t(W) = a_t + b_t \cdot W, \text{ Дж/кг К} \quad (1)$$

де: a_t та b_t – коефіцієнти апроксимації.

При виведенні залежностей $C=f(W)$ було заглажено ендотермічний пік у діапазоні низьких вологостей гриба ($W < 30$ % відн.), обумовлений, імовірно, витратами теплоти на деградацію білкових структур гриба через значне зневоднення тканин та зростанням теплоємності деградованих білків. Сушіння видалило молекули води, які утримують структуру білків.

Таблиця 1.

Апроксимація залежностей теплоємності плодового тіла гриба печериця звичайна від їх вологості при різній температурі

Вологість гриба $W = 95 \dots 0$ % відн.			
Температура гриба $t, ^\circ\text{C}$	Формула теплоємності $C_t(W), \text{Дж/кг К}$	Коефіцієнти апроксимації	
		a_t	b_t
32,5	$C = 1836,1 + 20,054 \cdot W$	1836,1	20,054
42,5	$C = 1895,9 + 20,446 \cdot W$	1895,9	20,446
52,5	$C = 1919,5 + 20,699 \cdot W$	1919,5	20,699
62,5	$C = 1836,1 + 21,833 \cdot W$	1912,3	21,833
77,5	$C = 1912,3 + 21,592 \cdot W$	1931,3	21,592
87,5	$C = 1960,0 + 22,170 \cdot W$	1960,0	22,170

Оскільки в проведених раніше експериментальних дослідженнях не було виведено загального рівняння для визначення теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця в залежності як від температури, так і від вологості гриба, робота була продовжена. Було зроблено лінійну апроксимацію залежності коефіцієнтів a_t та b_t від температури гриба:

$$a(t) = 1,6569 + 0,0020418 \cdot t \quad (2)$$

$$b(t) = 0,014877 + 0,0001969 \cdot t \quad (3)$$

Після підставлення отриманих формул (2) та (3) у формулу (1) отримали узагальнену формулу для визначення теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця звичайна при зміні їх температури та вологості в діапазонах $t = 32,5 \dots 87,5$ $^\circ\text{C}$ та $W = 95 \dots 0$ % відн.:

$$C_p(W,t) = a(t) + b(t)W = 1801,9 + 18,876W + 1,8124t + 0,0381tW, \text{ Дж/кг К} \quad (4)$$

Порівняння отриманих експериментальних даних зі значеннями теплоємності, які вираховували за формулою (4) (рис.13) показало, що вони достатньо добре (з середньою похибкою 2,12 %) співпадають. Окрім вологості гриба $W = 10$ % відн., при якій, імовірно, відбулася деградація білкових структур в тканинах гриба.

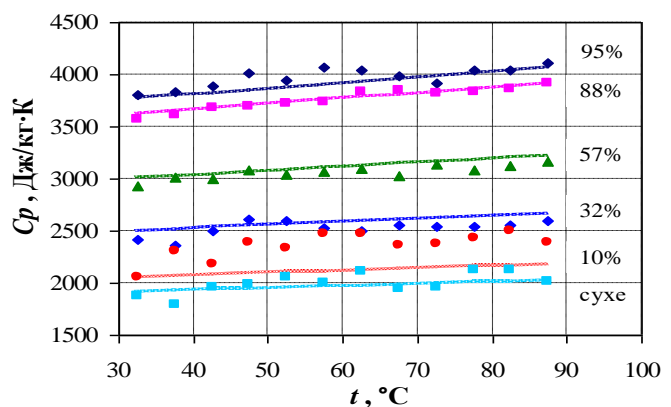


Рис. 13. Порівняння експериментальних даних зі значеннями теплоємності, які отримані за формулою (4)

Проведено розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння білкововмісної сировини рослинного походження. Проводимо побудову кривої кінетики сушіння грибів ерінги при температурі теплоносія 60°C (крива сушіння представлена на рис. 5) в координатах $W - N_{\text{max}} \tau$, для визначення характеру процесу сушіння (рис. 14).

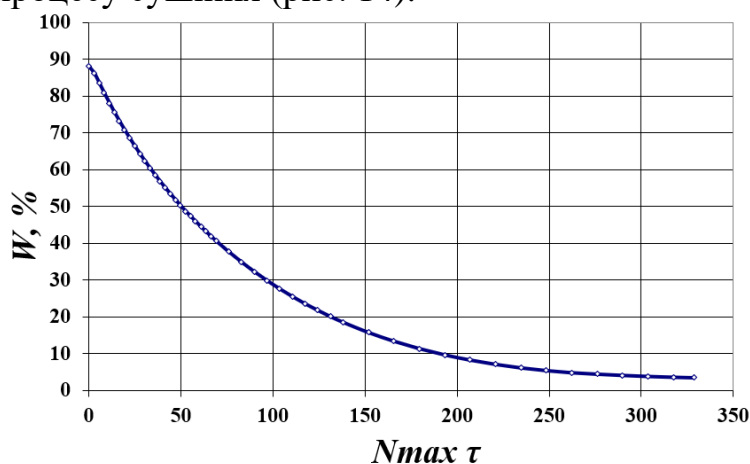


Рис. 14. Крива кінетики сушіння культивованих грибів ерінги в координатах $W - N_{\text{max}} \tau$, при: $t = 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

Із кривої кінетики сушіння проводимо побудову кривої швидкості сушіння із визначення критичних точок (рис. 15). На кривих знаходиться два періоди, другий період ділиться на дві або три частини, виявлені критичні точки K_1 , K_2 , K_3 і K_4 . Відмінність виявляється лише в кількісному відношенні.

При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді, у зв'язку з викладеним, обов'язково

повинні враховуватися величини емпіричних коефіцієнтів, обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти, як правило, визначаються безпосередньо, з досліду по сушінню даного матеріалу.

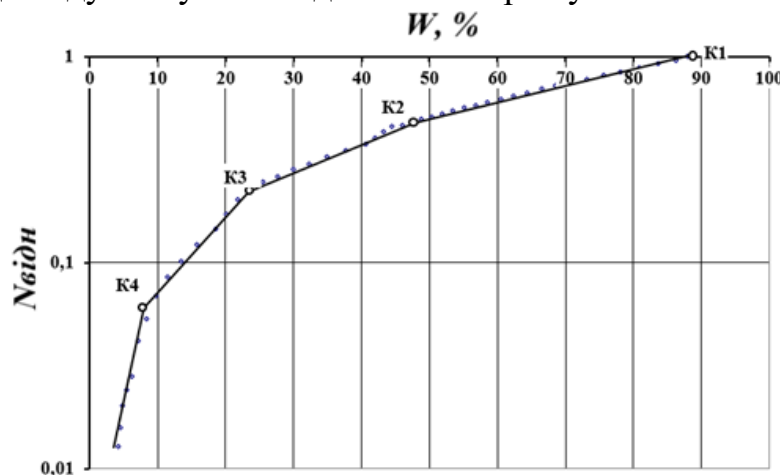


Рис. 15. Крива відносної швидкості сушіння культивованих грибів ерінги при: $t = 60^{\circ}\text{C}$ $v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

Так як перший період сушіння відсутній, розглядаємо рівняння для другого періоду сушіння.

Другий період сушіння починається при всіх режимах в W_{K_1} і часу τ , рівного тривалості першого періоду сушіння.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_1} - W_p) - K_1 \tau_1 \quad (5)$$

$$W_{K_1} \geq W \geq W_{K_2}$$

де K_1 – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду;

τ_1 – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(Wk_2 - Wp) - K_2\tau_2 \quad (6)$$

$$Wk_2 \geq W \geq Wk_3$$

де K_2 – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду;

τ_2 – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(Wk_3 - Wp) - K_3\tau_3 \quad (7)$$

$$Wk_3 \geq W \geq Wk_4$$

де K_3 – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду;

τ_3 – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

Рівняння для четвертої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(Wk_4 - Wp) - K_4\tau_4 \quad (8)$$

$$Wk_4 \geq W \geq Wk$$

де K_4 – коефіцієнт сушіння 4-ої частини другого періоду;

τ_4 – час, який відраховується від початку 4-ї частини другого періоду.

Величина Wp являє собою рівноважну вологість матеріалу. Величина Wk визначає кінцеву вологість висушеного матеріалу.

Відносні коефіцієнти сушіння легко визначаються з дослідної кривої за наступним виразом:

$$\chi_1 = \frac{\lg(Wk_1 - Wp) - \lg(Wk_2 - Wp)}{N \max \tau_1} \quad (9)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg(Wk_2 - Wp) - \lg(Wk_3 - Wp)}{N \max \tau_2} \quad (10)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg(Wk_3 - Wp) - \lg(Wk_4 - Wp)}{N \max \tau_3} \quad (11)$$

$$\chi_4 = \frac{\lg(Wk_4 - Wp) - \lg(Wk - Wp)}{N \max \tau_4} \quad (12)$$

Проводимо відповідні розрахунки відносних коефіцієнтів сушіння за формулами 9 – 11:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \frac{\lg Wk_1 - \lg Wk_2}{N\tau_1} = \frac{\lg 83,57 - \lg 47,32}{1,38 * 40} = 0,0045 \\ \chi_2 &= \frac{\lg Wk_2 - \lg Wk_3}{N\tau_2} = \frac{\lg 47,32 - \lg 23,59}{1,38 * 45} = 0,0048 \\ \chi_3 &= \frac{\lg Wk_3 - \lg Wk_4}{N\tau_3} = \frac{\lg 23,59 - \lg 9,28}{1,38 * 65} = 0,0045 \\ \chi_4 &= \frac{\lg Wk_4 - \lg Wk}{N\tau_4} = \frac{\lg 9,28 - \lg 4,12}{1,38 * 70} = 0,0036 \end{aligned} \quad (13)$$

Коефіцієнти K_1 , K_2 і K_3 – називають коефіцієнтами сушіння, чисельно рівне тангенсам кутів нахилу відрізків прямих до вісі τ в напівлогарифмічному анаморфозі. Величина цих коефіцієнтів залежить від роду вологого матеріалу, його властивостей, режиму і методу сушіння.

$$K_1 = \chi_1 N \quad (14)$$

$$K_2 = \chi_2 N \quad (15)$$

$$K_3 = \chi_3 N \quad (16)$$

$$K_4 = \chi_4 N \quad (17)$$

Проводимо розрахунки коефіцієнтів сушіння за формулами 14 – 17:

$$K_1 = \chi_1 N = 0,0044 * 1,38 = 0,0061$$

$$K_2 = \chi_2 N = 0,0048 * 1,38 = 0,0067$$

$$K_3 = \chi_3 N = 0,0045 * 1,38 = 0,0062$$

$$K_4 = \chi_4 N = 0,0036 * 1,38 = 0,005$$

Загальна тривалість процесу сушіння τ_T (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_1 , в 1-й τ_2 , 2-й τ_3 і 3-й τ_4 частинах другого періоду:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \quad (18)$$

Загальна тривалість сушіння грибів ерінги із врахуванням 4-х періодів сушіння становить:

$$\tau_T = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3}}{W_{K_4}} + \lg \frac{W_{K_4}}{W_K} \right) = \frac{1}{1,38} \left(\frac{1}{0,0044} \lg \frac{83,57}{47,32} + \frac{1}{0,0048} \lg \frac{47,32}{23,59} + \frac{1}{0,0045} \lg \frac{23,59}{9,28} + \frac{1}{0,0036} \lg \frac{9,28}{4,12} \right) = 221 \text{ хв} \quad (19)$$

На графіку представленому на рис. 5 тривалість процесу сушіння становить 240 хв, що більше на 19 хв за розрахункову, або похибка складає 8,5%.

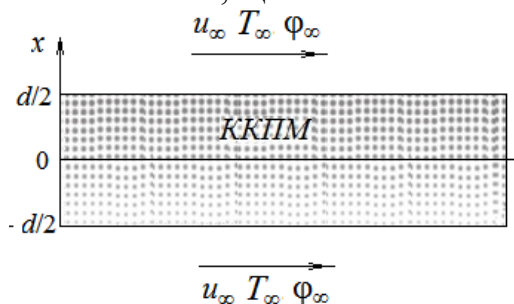


Рис. 16. – Схема до фізичної моделі процесу конвективного сушіння ККПМ

Розроблена фізична та математична модель процесу сушіння сировини (колоїдних капілярно-пористих матеріалів, або ККПМ).

Колоїдні капілярно-пористі матеріали - це складні, дисперсні, гетерогенні матеріали, що мають тонку капілярну структуру (радіуси пор $< 0,01$ мм) і здатні до значної усадки та зміни об'єму при видаленні вологи. На

відміну від звичайних пористих тіл, їхня структура еластична, а зв'язок вологи з матеріалом має адсорбційний характер. Колоїдні капілярно-пористі тіла характеризуються високим вмістом адсорбційно зв'язаної вологи, тому їх сушіння є енергоємним процесом. До колоїдних капілярно-пористих матеріалів відносяться культивовані гриби.

Процес конвективного сушіння відбувається наступним чином: сировина, що знаходиться на піддоні, обдувається потоком теплоносія. З теплоносієм контактує зовнішня поверхня матеріалу, що висушується (рис. 16).

Розрахункові дослідження процесу тепломасопереносу в колоїдному капілярно-пористому матеріалі, що відбувається при конвекційному сушінні, виконуються шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь, до якої входять:

- рівняння переносу вологи

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \operatorname{div}(a_m \cdot \operatorname{grad}(U)) + \operatorname{div}(a_m \delta_t \cdot \operatorname{grad}(T)) \quad (20)$$

- рівняння переносу енергії

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) + r\varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (21)$$

де U , кг/м³ - питомий вологовміст матеріалу (сумарна маса рідкої вологи та водяної пари в одиниці об'єму матеріалу); T , К - температура; τ , с - час; a_m , м²/с - коефіцієнт дифузії вологи в капілярно-пористому матеріалі; δ_t , кг/(м³К) - термоградієнтний коефіцієнт; c , Дж/(кг·К) - ефективна теплоємність матеріалу; ρ , кг/м³ - ефективна густина матеріалу; λ , Вт/(м·К) - ефективна теплопровідність матеріалу; r , Дж/кг - питома теплота випаровування; ε - коефіцієнт фазового перетворення, який характеризує відношення потоку водяної пари до сумарного потоку рідкої вологи та потоку пари. Його величина змінюється в межах від 0 до 1.

Чисельні дослідження виконуються для випадку конвекційного сушіння зразка ККПМ. Даний процес передбачає підведення теплоти конвекцією від розігрітого повітряного потоку до матеріалу, що висушується. Зразок матеріалу, що має форму прямокутного паралелепіпеда, розміщується в сушильній камері, у яку подається розігрітий теплоносій.

Задача тепломасопереносу розглядається в наближеній одновимірній постановці. Вважається, що тепломасообмін відбувається переважно в напрямку осі Ox (рис. 16), що перпендикулярний до поверхні зразка. Значення $x=0$ відповідає площині симетрії, а $x=d/2$ – поверхні матеріалу. Процес вважається симетричним відносно площини симетрії прямокутного зразка. Для випадку відносно малої товщини зразка d , а також при невисоких градієнтах температури, переносом вологи термодифузією можна знехтувати.

Граничні умови до рівнянь (20), (21) на поверхні тепломасообміну мають вигляд:

$$-a_m \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) \quad ; \quad (22)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d/2} = \alpha(T_w - T_\infty) + r(1 - \varepsilon_w)\beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) \quad ; \quad (23)$$

де $C_{v,w}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії біля поверхні тепломасообміну; $C_{v,\infty}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії на значній відстані від поверхні; T_w - температура поверхні тепломасообміну; T_∞ - температура теплоносія на значній відстані від поверхні; α , Вт/(м²К) - коефіцієнт тепловіддачі; β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі.

Граничні умови на площині симетрії мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 ; \quad (24)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 . \quad (25)$$

Умова (22) встановлює рівність між сумарним потоком рідкої та пароподібної вологи, що надходить до поверхні з середини матеріалу, та потоком, що видаляється з поверхні матеріалу та надходить до теплоносія. В правій частині виразу (22) міститься різниця між відносною концентрацією водяної пари у повітрі біля поверхні тепломасообміну ($C_{v,w}$) та відносною концентрацією водяної пари в теплоносії на значній відстані від цієї поверхні ($C_{v,\infty}$). Величина $C_{v,\infty}$ має бути відомою з початкових умов задачі, так само як і температура теплоносія T_∞ . Величина $C_{v,w}$ визначається в ході розв'язання задачі в залежності від вологісного стану поверхні матеріалу. У випадку, коли вологовміст матеріалу біля поверхні масообміну перевищує величину максимального гігроскопічного вологовмісту, концентрація водяної пари визначається з умов для насиченої пари, що відповідають температурі цієї поверхні. Якщо вологовміст матеріалу біля поверхні менший за максимальне гігроскопічне значення, концентрація водяної пари визначається з ізотерми сорбції за величинами вологовмісту матеріалу біля поверхні та температури цієї поверхні.

Ізотерми сорбції зазвичай представляються у вигляді експериментально визначеної залежності рівноважної концентрації рідини у зразку W від відносної вологості повітря $\varphi = p_v/p_{v,s}$. Для її застосування при розв'язанні системи рівнянь (20), (21) цю залежність доцільно перебудувати у вигляді залежності рівноважного питомого вологовмісту матеріалу U від відносної концентрації водяної пари у повітрі $C_{v,w} = \rho_{v,w}/(\rho_{v,w} + \rho_{a,w})$. Для цього за величиною питомого вологовмісту на поверхні U_w визначається відносна концентрація вологи у матеріалі W_w , що розраховується як відношення маси вологи до всієї маси вологого матеріалу:

$$W_w = \frac{U_w}{U_w + m_c/V} , \quad (26)$$

де m_c - маса сухого матеріалу; V - об'єм зразка.

За значеннями W_w та температури поверхні T_w по ізотермі сорбції визначається відповідна величина відносної вологості повітря φ . Далі відповідне значення відносної концентрації водяної пари в повітрі розраховується за формулою:

$$C_{v,w} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\varphi p_{v,s}(T_w)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}} , \quad (27)$$

де p_0 - тиск у пароповітряній суміші, p_v - парціальний тиск водяної пари, $p_{v,s}$ парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_w , R_v ; R_a - газові сталі для водяної пари та сухого повітря відповідно.

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тепломасообміну визначається з відповідного рівняння подібності, що враховує режим течії теплоносія. У випадку, коли горизонтальний плоский зразок омивається турбулентним повітряним потоком, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі можна скористатися рівнянням:

$$Nu_l = 0,037 Re_l^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_a / Pr_w)^{0,25}, \quad (28)$$

де $Nu_l = \alpha l / \lambda_a$ - осереднене по поверхні теплообміну довжиною l число Нуссельта, $Re = u_\infty l / \nu_a$ - число Рейнольдса; $Pr = \nu_a / \alpha_a$ - число Прандтля для повітря, u_∞ - швидкість незбуреного повітряного потоку; ν_a - кінематичний коефіцієнт в'язкості для повітря.

Коефіцієнт масовіддачі β можна за аналогією між теплопереносом та масопереносом визначити з наближеного співвідношення

$$\beta \approx \frac{\alpha}{C_a} \quad (29)$$

На відміну від граничних умов теплообміну третього роду на поверхні сухого матеріалу, граничні умови (23) для вологого матеріалу враховують теплоту випаровування рідкої вологи з поверхні. Ця теплота визначається другою складовою, що входить у праву частину виразу (23). Коефіцієнт фазового перетворення ε_w на поверхні тепломасообміну, що входить до граничної умови (23), визначає співвідношення між потоком водяної пари, що надходить до поверхні з середини зразка, до сумарного потоку пари та рідкої вологи. Якщо поверхня перезволожена, як це в ряді випадків має місце на початковій стадії сушіння, коефіцієнт ε_w можна прийняти рівним нулю. Це означає, що водяна пара утворюється лише на самій поверхні тепломасообміну і не надходить до поверхні з середини зразка. На заключній стадії сушіння, коли поверхня майже висušена, а випаровування здійснюється в глибинних шарах зразка, коефіцієнт ε_w матиме значення, близьке до одиниці. Це означає, що до поверхні тепломасообміну волога з середини зразка надходить лише у вигляді водяної пари. В цьому випадку фазового перетворення на самій поверхні не відбувається.

В першому наближенні можна прийняти $\varepsilon_w = 0$, коли відносна вологість матеріалу біля поверхні тепломасообміну перевищує максимальне гігроскопічне значення, яке відповідає $\phi = 100\%$ і температурі поверхні матеріалу. Якщо відносна вологість матеріалу біля поверхні менша за максимальну гігроскопічну вологість, можна припустити, що значення $\varepsilon_w \sim 1$.

Початковими умовами для рівнянь перенесення теплоти і вологи є вихідні розподіли температури T та питомого вологовмісту U . Для розв'язання задачі задаються також швидкість u_∞ , температура T_∞ та відносна вологість теплоносія ϕ_∞ . Для чисельного розв'язання системи рівнянь (20), (21) з граничними умовами (22) - (25) застосовується метод скінчених різниць. Для його використання розрахункова область $0 \leq x \leq d/2$ розподіляється на m кроків довжиною $\Delta x = d/(2m)$. Всередині кожного кроку визначаються розрахункові вузли, у яких записуються дискретні аналоги диференціальних рівнянь (20), (21). Таким чином будується різницева розрахункова сітка. Граничні умови (22) - (25) також представляються в скінчено-різницевої формі.

Система різницевих рівнянь складається за неявною часовою схемою і розв'язується методом прогонки з застосуванням ітерацій. Коефіцієнти дифузії a_m , теплопровідності λ , теплоємності c , а також густина ρ і теплота випаровування r зазвичай залежать від вологовмісту та температури матеріалу, тобто від невідомих величин, що входять до цих рівнянь. Тому значення цих коефіцієнтів визначаються за величинами вологовмісту матеріалу і температури, що відносяться до попереднього часового кроку. Надалі значення цих коефіцієнтів уточнюються.

За наведеним методом виконується чисельне моделювання процесу конвекційного сушіння зразка культивованих грибів товщиною $d = 10$ мм. Швидкість повітряного потоку в сушильній камері $u_\infty = 3$ м/с, його температура $T_\infty = 60^\circ\text{C}$. Значення d для теплоносія складає 10 г/кг с.п. Початкова маса зразка $m_0 = 35,1$ г. Його початкова температура $T_0 = 28,5^\circ\text{C}$. Маса сухого матеріалу $m_c = 4,35$ г. Теплофізичні властивості культивованих грибів, а також криві сорбції визначено експериментально.

За наведеними вихідними даними крім розрахункових досліджень проведено також експериментальні дослідження з метою порівняння їх результатів.

Для виконання розрахунків будується різницева сітка, що містить $m=100$ кроків на половині товщини зразка $d/2$. Крок за часом складає $\Delta\tau=1$ с. В результаті чисельного моделювання одержано розподіли по товщині зразка температури (рис. 17) в різні моменти часу. Як видно з рис. 17, найбільш інтенсивна зміна у часі температури відбувається на поверхні тепломасообміну ($x=5$ мм). Зміну у часі температури матеріалу наведено на рис. 18.

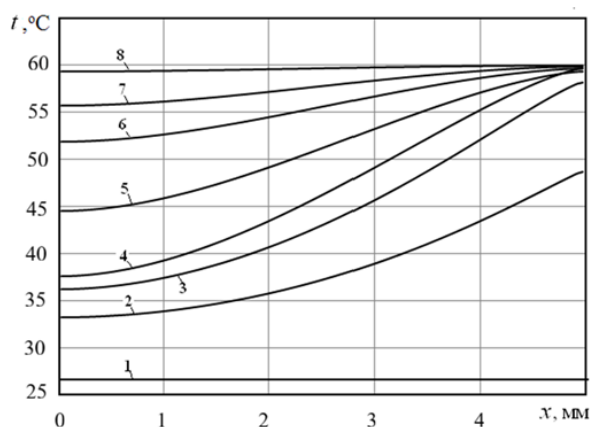


Рис. 17. Розподіл температури по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні грибів ерінги:
1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв;
3 – 20 хв; 4 – 30 хв; 5 – 40 хв;
6 – 50 хв; 7 – 60 хв; 8 – 90 хв

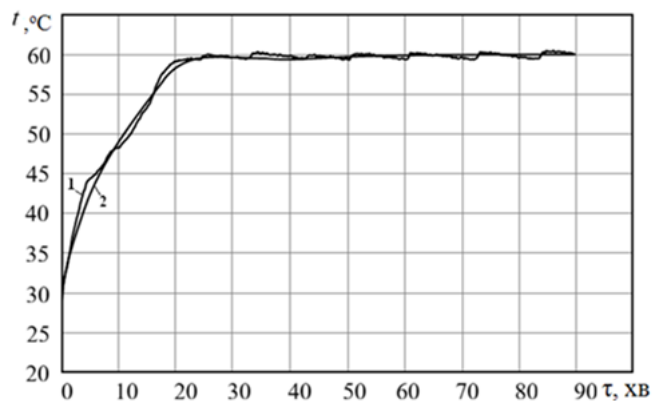


Рис. 18 Зміна у часі температури грибів ерінги:
1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

На рис. 18 наведено також порівняння результатів розрахунків за наведеною моделлю (крива 2) з результатами експерименту (крива 1). Як видно з цього рисунку, збіг результатів розрахунків осередненої температури з результатами експерименту достатньо задовільний. З рисунку також видно, що найбільш інтенсивна зміна температури відбувається протягом перших 20

хвилин. Найбільш інтенсивна зміна вологовмісту матеріалу відбувається протягом перших 30 хвилин.

За визначеною величиною питомого вологовмісту розраховується також зміна у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку $m_w(\tau)$.

$$m_w = F \cdot \int_0^{d/2} U(x) dx \quad (30)$$

На рис. 19 наведено залежність цієї величини від часу (крива 1) та зміну у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку, що отримана з експериментальних досліджень (крива 2). Як видно з порівняння цих кривих, на початковій стадії сушіння (протягом 40 хв) маса води в зразку, що одержана з розрахунків, більша, ніж та, що визначена з експерименту. На наступній стадії сушіння розрахункове значення маси води практично збігається з експериментальним значенням.

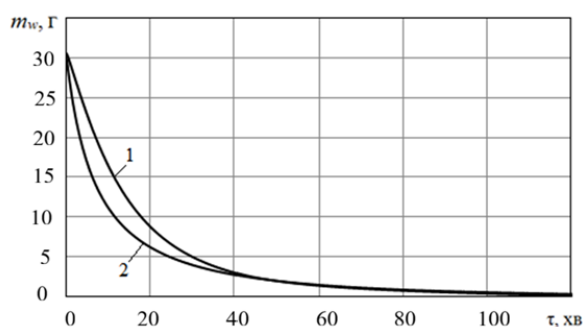


Рис. 19. Зміна у часі маси води у зразку, що досліджується:
1 – розрахунок за моделлю;
2 – експеримент

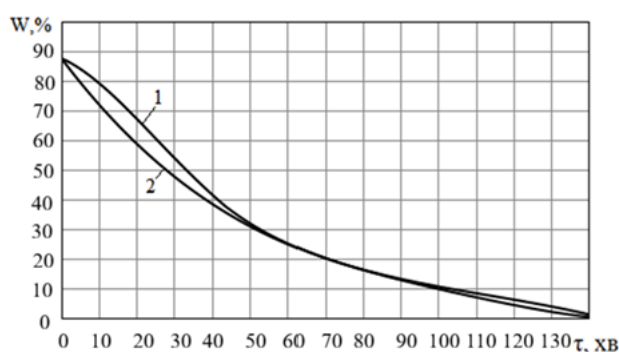


Рис. 20. Зміна у часі відносної концентрації води у зразку:
1 – розрахунок за моделлю;
2 – експеримент

Визначається також зміна у часі відносної концентрації води у зразку $W(\tau)$:

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_c} \quad (31)$$

Зміну у часі значень цієї величини, що отримані з розрахунків та з експерименту, представлено на рис. 20.

З порівняння розрахункових та експериментальних даних випливає, що за даною чисельною моделлю процес сушіння на початковій стадії протікає дещо повільніше, ніж це випливає з експерименту. Надалі інтенсивність висушування матеріалу, що визначається з розрахунків, виявляється практично однаковою, з тією, що одержана з експерименту.

За результатами розрахункових досліджень визначається також швидкість конвекційного сушіння досліджуваного зразку $\frac{dm_w}{d\tau}$. Залежність цієї величини від часу наведено на рис. 21. Як видно з рисунку, на початковій стадії сушіння швидкість цього процесу зростає. Найбільша швидкість сушіння зразка $dm_w/d\tau = 1,6$ г/хв спостерігається на початковій стадії сушіння. Далі швидкість сушіння починає спадати.

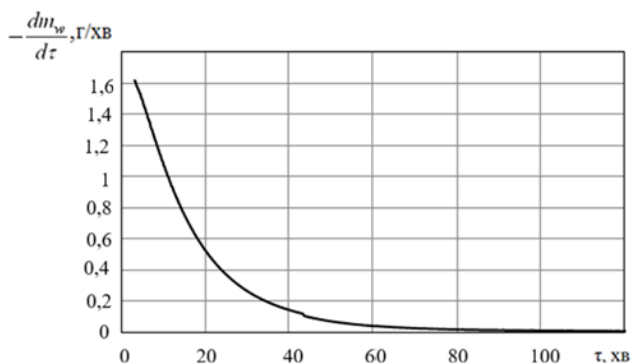


Рис. 21. Залежність від часу швидкості сушіння зразка

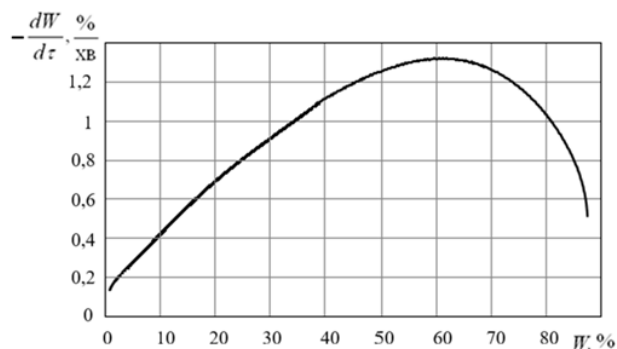


Рис. 22. Залежність від вологовмісту швидкості сушіння зразка

Даний характер зміни у часі швидкості сушіння пояснюється тим, що, як випливає з залежності (22), густина потоку маси з поверхні зразка зростає зі збільшенням відносної концентрації водяної пари $C_{v,w}$ біля цієї поверхні. Ця величина збільшується з ростом температури поверхні t_w та зменшується зі зниженням відносної концентрації вологи на поверхні W_w .

Оскільки в процесі конвекційного сушіння водночас зростає температура поверхні і зменшується її вологовміст, величина $C_{v,w}$ залежатиме від того, який саме з цих двох параметрів суттєвіше на неї впливає в даний момент часу. Таким чином, від початку сушіння величина $C_{v,w}$ зростає і при $W=60\%$ набуває максимального значення, а далі з часом починає спадати.

Порівняння результатів чисельного моделювання процесів конвекційного сушіння зразка ККПМ з експериментальними результатами показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Водночас спостерігається певна розбіжність у кількісних показниках даних результатів. Отже, розглянута розрахункова модель може бути використана для наближеного визначення характеристик процесу сушіння білкововмісної сировини, зокрема часу.

У четвертому розділі «Дослідження тепломасообмінних процесів сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія» представлено дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій сушарці, яка розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України (рис. 23) та складається із сушильної камери (1), в яку заїжджають два візки (5,7). Корпус, в свою чергу, поділяється на внутрішній та зовнішній. Сушильна камера (1) ізолювана базальтовою ватою, товщина шару якої коливається від 0,2 до 0,35 м. Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) (продуктивність 4000 м³/год., робочий тиск 360 Па) на вході в сушильну камеру. Для нагріву теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4,6) загальною потужністю 42 кВт. Кабелі, котрі живлять нагрівальні елементи всередині камери, використали негорючого типу НГ із температурним допуском +110 °С. Для роботи камерної сушарки передбачені автоматичні пристрої для регулювання: температури теплоносія (реле температури ТК-6); час роботи (реле часу Т-2); швидкість руху теплоносія (частотний регулятор).

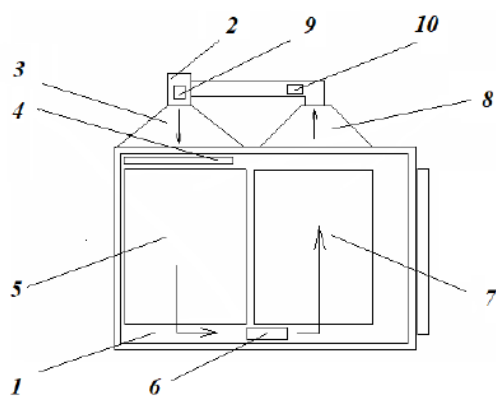


Рис. 23. Схема дослідно-промислової камерної сушарки:
 1 – камера, 2 – відцентровий вентилятор, 3 – дифузор,
 4 – перша батарея нагрівальних елементів, 5 – перший візок,
 6 – друга батарея нагрівальних елементів, 7 – другий візок,
 8 – конфузор, 9 – шибер,
 10 – компенсуючий шибер



а) б) в)
 Рис. 24. Енергоефективна дослідно-промислова камерна сушарка:
 а – вигляд спереду, б – шафа керування, в – вигляд з візками

В середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологості та температури РКВТ – 2/16. Вони розміщені на вході в сушарку теплового агента, між візками та на виході із сушарки теплоносія. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагента в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря.

Для збільшення ефективності всередині камери змонтовані нагрівальні елементи, відповідно до руху теплового агента, які встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. Зовнішній вигляд сушарки представлений на рис. 24.

Характер процесу сушіння найбільш точно описується кривими тривалості та швидкості сушіння. На рис. 25.а представлені криві сушіння м'ясної сировини при наступних параметрах сушіння: температури теплоносія $t = 60^{\circ}\text{C}$, швидкості руху теплоносія $V = 3 \text{ м/с}$, товщина матеріалу $\delta = 5 \text{ мм}$, вологовміст повітря $d = 10 \text{ кг/г с.п.}$. Процес триває 300 хв. Крива 1,1' показує режим сушіння без зміни напрямку потоку, а 2,2' – зі зміною напрямку потоку теплоносія. Як видно, температура матеріалу зростає поступово протягом всього процесу для обох режимів (криві 1',2'). Криві 1,2 вказують на зміну вологості матеріалу. Як видно з рис. 25.а, після зміни напрямку потоку теплоносія на 120 хв (крива 2), видалення вологості у випадку зміни потоку теплоносія стає більш інтенсивним, починаючи із 150 хв експерименту. Тобто, вологість матеріалу при режимі без зміни потоку теплоносія становить 18 % на 300-ій хв., а при режимі зі зміною напрямку потоку – цю ж вологість досліджуваній зразок має вже на 250 хв.

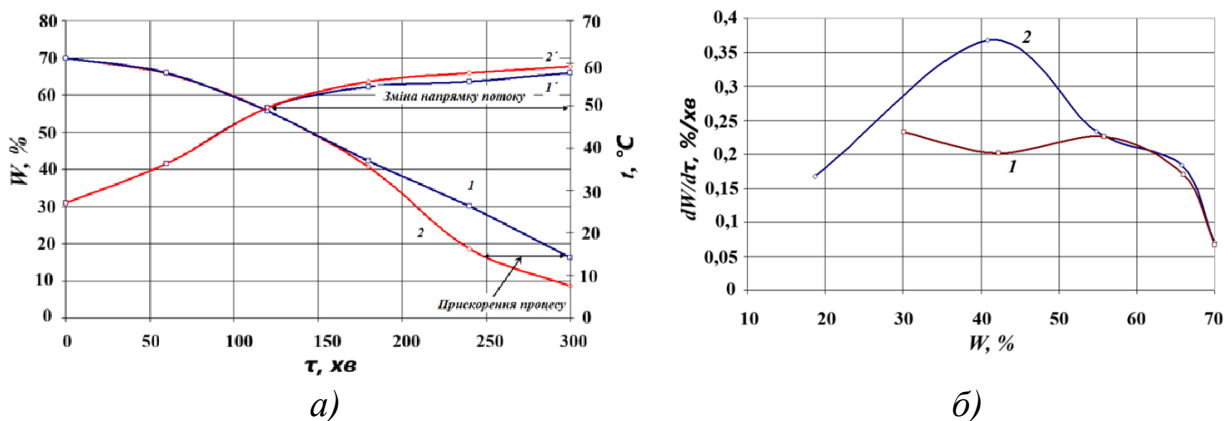


Рис. 25. Вплив температури теплоносія та зміни його напрямку на тривалість (а) та швидкість (б) сушіння м'яса на дослідно-промисловій камерній сушарці при $t = 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3$ м/с, $\delta = 5$ мм, $d = 10$ кг/г с.п.:

- 1 – без зміни напрямку потоку; 2 – із зміною напрямку потоку;
- 1' – температура в середині матеріалу без зміни напрямку потоку;
- 2' - температура в середині матеріалу із зміною напрямку потоку

Кінцева температура нагрівання м'яса при сушінні без зміни напрямку потоку сушильного агента становить $57,7^{\circ}\text{C}$, із зміною напрямку потоку $59,3^{\circ}\text{C}$. Інтенсивність процесу сушіння в камерній сушарці обмежено температурою нагрівання продукту, тому сушіння проводиться при низьких температурних параметрах теплоносія, яка не повинна перевищувати 60°C . Тому для прискорення процесу сушіння вибрано зміни напрямку потоку сушильного агента. Даний спосіб дозволяє зменшити тривалість сушіння на 50 хв, або на 20 %, що також підтверджено даними, отриманими раніше. Найбільш доцільно, провести зміну напрямку на 120 хв або через 2 години, в області зниження видалення вологи з матеріалу.

Були отримані криві швидкості сушіння на дослідно-промисловій камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія (рис. 25.б), які показують зміну вологи матеріалу за одиницю часу ($dW/d\tau$). Як видно з рисунку, максимальна швидкість сушіння без зміни напрямку потоку сушильного агента складає $0,22$ %/хв (крива 1), а із зміною – $0,37$ %/хв. (крива 2). Отже, максимальна швидкість сушіння зі зміною потоку теплоносія є в 1,68 раз вища.

З метою підвищення інтенсифікації процесу зневоднення культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці було застосовано конвективний 60°C та комбінований спосіб сушіння 3800 Вт/м²+ 60°C , який раніше був досліджений на експериментальному сушильному стенді.

На рис. 26 представлено зміну вологості та температури культивованих грибів печериця звичайна в залежності від режиму сушіння. Як видно з температурної кривої 1', за сушіння конвективним способом 60°C , на початку процесу відбувається прогрівання матеріалу. За комбінованого способу зневоднення 3800 Вт/м²+ 60°C (крива 2'), на початку процесу сушіння, коли подається теплота від двох енергоносіїв, спостерігається різке зростання температури матеріалу до 46°C . Так відбувається протягом перших 30 хв експерименту. Після цього теплоносіїв інфрачервоного випромінювання вимикали і далі процес продовжувався за конвективного сушіння 60°C .

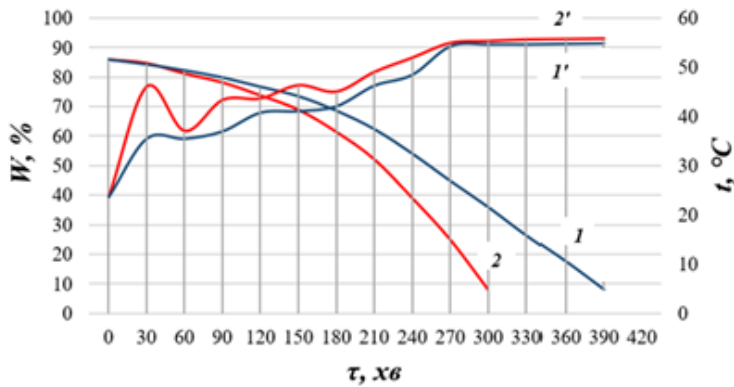


Рис. 26. Зміна вологості та температури культивованих грибів печериця звичайна в залежності від способу сушіння на дослідно-промисловій сушарці $V = 3 \text{ м/с}$, $\delta = 5 \text{ мм}$, $d = 10 \text{ кг/г с.п.}$:

1,1' – 60°C , 2, 2' – $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$

експерименту спостерігається, що випаровування вологи матеріалу відбувається інтенсивніше при комбінованому способі і так триває до кінця процесу. Відповідно, за 300 хв експерименту за конвективного способу матеріал досягнув позначки вологості 35 %, а за комбінованого до 8 %. Для досягнення вологості матеріалу 8 % при температурі теплоносія 60°C тривалість процесу становить 390 хв, що на 90 хв довше, ніж при комбінованому $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$.

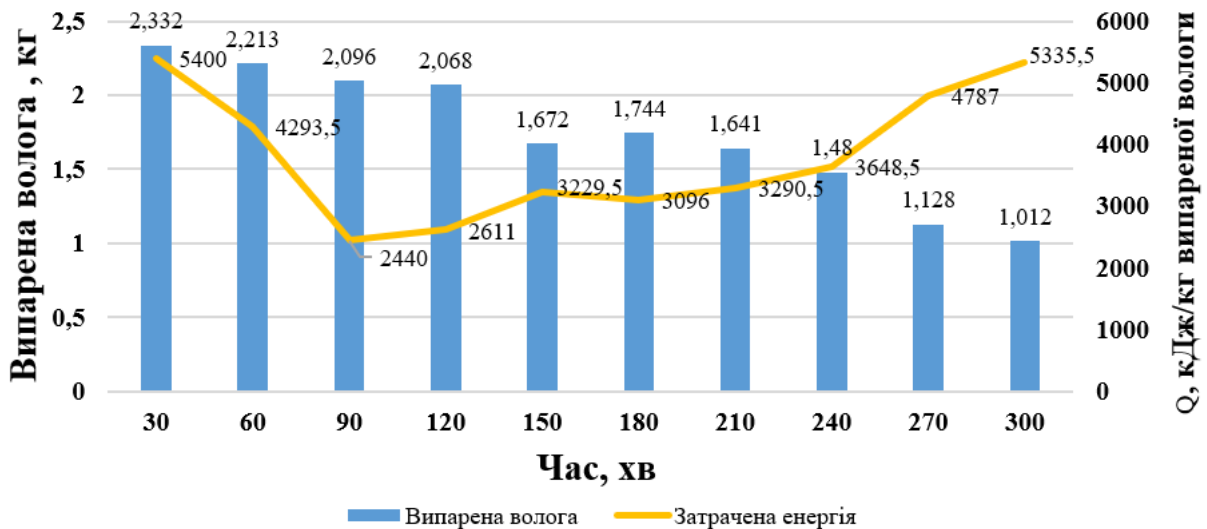


Рис. 27. Питомі погодинні витрати енергії на випарену вологу при комбінованому інфрачервоно-конвективному способі сушіння $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$

На рис. 27 представлена діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при режимі сушіння $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$ культивованих грибів печериця звичайна. Процес сушіння культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці становить 300 хв. На початку процесу сушіння відбувається інтенсивне випаровування вологи. Наприклад, за перші 30 хв експерименту було випарено 2,332 кг вологи, через наступні 30 – ще 2,213 кг вологи.

Із діаграми видно, що на початку процесу перші 30 хв спостерігаємо високі енергетичні витрати на нагрів матеріалу. Далі, по мірі прогрівання, витрати

Відповідно, температура матеріалу при цьому різко знижувалась, а далі поступово збільшувалась до кінця процесу. Однак, як видно з рисунку при комбінованому способі температура матеріалу весь процес була вищою у порівнянні із конвективним способом.

Як видно з кривих 1,2 зміна вологості відбувається на початку процесу однаковою, проте після 45 хв

енергії зменшуються (на 90 хв) майже вдвічі. Це говорить про те, що матеріал прогрівся і почала випаровуватись волога. На даному етапі спостерігаємо найбільш енергоефективний показник. З 90 хв по 240 хв отримуємо більш-менш рівномірну витрату енергії, яка незначно зростає, а випаровування вологи в цей час зменшується. З 240 хв бачимо різке зростання витрат енергії при мінімальному випаровуванні вологи. Це триває до 300 хв. При цьому енергія витрачається на нагрів матеріалу. Процес сушіння необхідно зупиняти.

У п'ятому розділі «Дослідження процесів диспергування, визначення якісних характеристик та адсорбційних властивостей білкововмісної сировини» представлено дослідження процесу подрібнення, яке проводили після сушіння на молотковій дробарці. Проведено ситовий аналіз на комплекті сит, зібраних у послідовності 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,25; 0,16; 0,1, в результаті чого отримано порошок з культивованих грибів із високим відсотком оптимальної фракції менше 0,5 мм. Виходячи із результатів досліджень, рекомендовано використовувати молоткову дробарку для подрібнення культивованих грибів.

Показник відновлюваності визначали для білкововмісної сировини тваринного походження (рис. 28. а,б). Досліджуючи м'ясо свинини визначали якісні показники для гранул та кубиків, а для яловичини лише для гранул. Температури витримки під час експериментального дослідження відновлюваності становила 45 °С та 90 °С. Як видно з рис. 28.а, для гранул свинини навіть при температурі витримки 45°С показник відновлюваності знаходиться в межах 130 - 170 %, а для кубиків – 100 - 120 %. За температури витримки 90°С показник відновлюваності є ще вищим – 160 - 190 % для гранул, 120 - 130 % для кубиків.

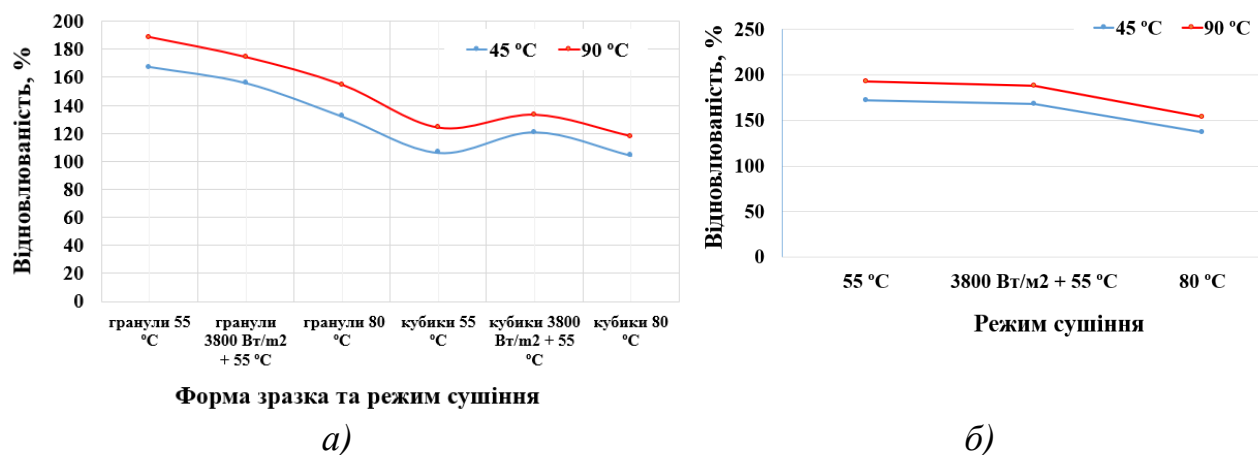


Рис. 28. Відновлюваність м'яса свинини (а) та яловичини (б) при температурі витримки 45°С та 90°С

На рис. 28.б представлено дослідження відновлюваності для м'яса яловичини у вигляді гранул, оскільки, як було визначено у третьому розділі, сушити м'ясну сировину у вигляді кубиків енергетично недоцільно. Як видно, загальна тенденція спостерігається як і для м'яса свинини. Найбільший показник відновлюваності – 185 - 195 %. Це свідчить про те, що розроблені режими зневоднення дозволяють зберегти якісні показники білкововмісної сировини тваринного походження на високому рівні.

Для визначення якості сухих грибів визначали відновлюваність за різних способів зневоднення та форми зразка (пластина, порошок).

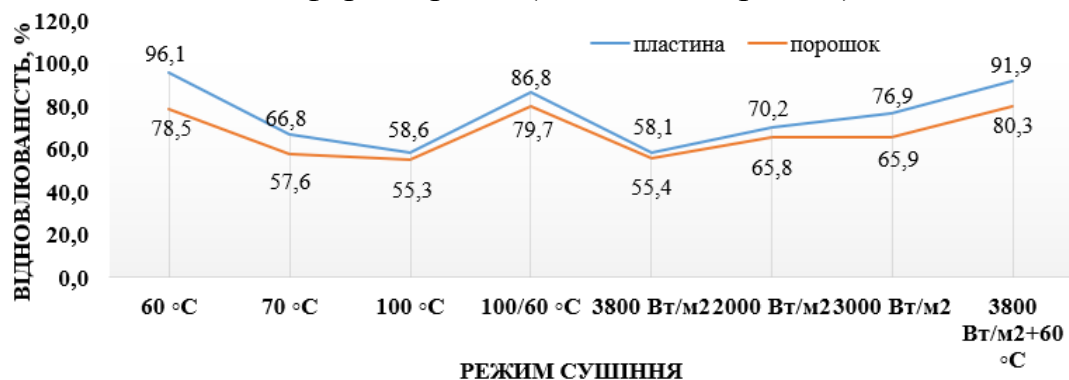


Рис. 29. Відновлюваність культивованих грибів ерінги у формі пластин та порошку після сушіння при різних режимах

На рис. 29 на прикладі культивованих грибів ерінги показано, що показник відновлюваності є вищим для пластин, ніж для порошку для всіх представлених способів сушіння. Найвище значення відновлюваності є для режимів сушіння 60°C, комбінованого 3800 Вт/м² + 60°C та конвективного двоступеневого 100/60°C, а найнижчий – для 100°C та для сушіння інфрачервоним випромінюванням з потужністю лампи 3800 Вт/м².

Рівноважна вологість має важливе значення для розробки теплотехнологій отримання сухих білкововмісних харчових продуктів, оскільки визначає кінцевий вологовміст при сушінні, а також умови зберігання. Сухі продукти адсорбують з навколишнього середовища на зовнішній і внутрішній сильно розвиненій поверхні, оскільки їх поверхня має вільну енергію. Адсорбція на поверхні твердого дисперсного тіла йде мимовільно і до тих пір, поки не встановиться динамічний рівноважний стан цієї термодинамічної системи.

На підставі експериментальних даних про рівноважний вологовміст були побудовані ізотерми адсорбції водяної пари функціональних порошків, які представлені на рис. 30.а,б.

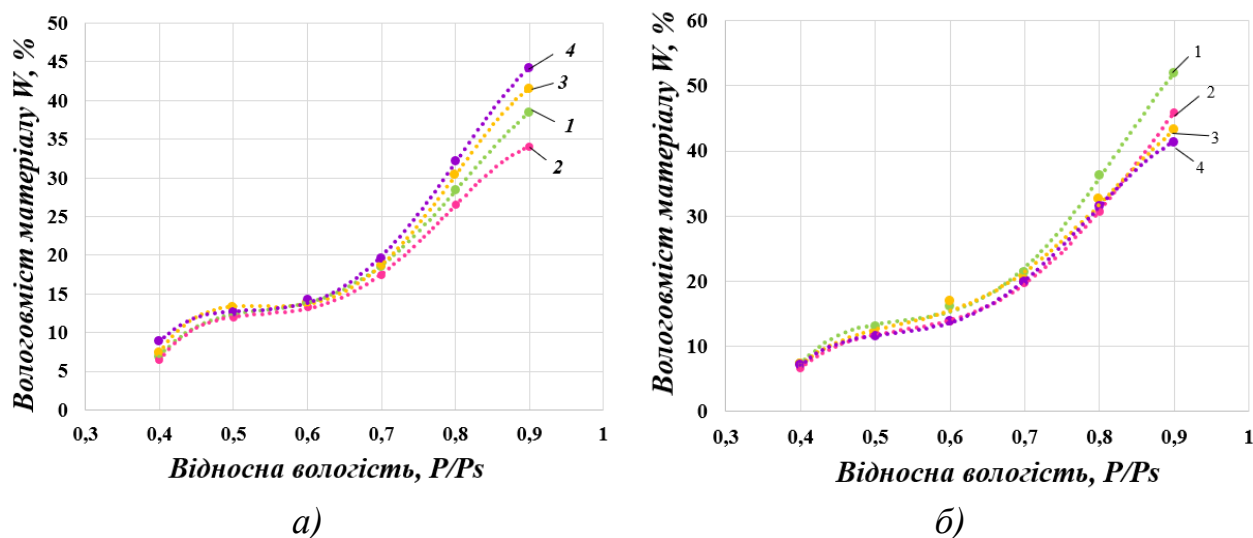


Рис. 30. Ізотерми адсорбції водяної пари грибів ерінги (а) та шиїтаке (б), висушених при наступних режимах:
1 – 60°C, 2 – 100/60°C, 3 – 3800 Вт/м², 4 – 3800 Вт/м²+60°C

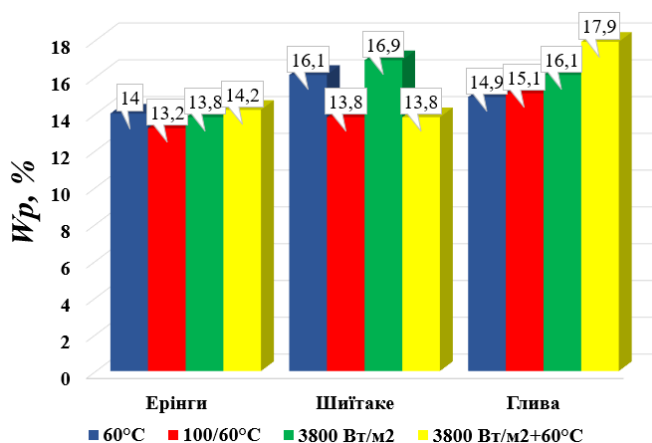


Рис. 31. Рівноважна вологість грибів за різних режимів сушіння при відносній вологості повітря 0,6

Порівняння ізотерм адсорбції культивованих грибів показує, що маючи схожий характер цих ізотерм і однакові форми зв'язування води (адсорбційну, капілярну та осмотичну) в той же час відрізняються один від одного рівноважною вологістю (рис. 31). Це можна пояснити їх різним хімічним складом для кожного виду культивованих грибів.

Крім сорбційних властивостей було досліджено активність води для м'ясної

сировини та культивованих грибів. Активність води (a_w) – це один із критичних показників при визначенні якості харчових продуктів; це показник вільної води в продукті, яка доступна для хімічних реакцій, росту і розвитку мікроорганізмів, який має значення в межах від 0 до 1,0 і є важливим для харчової безпеки, впливає на термін зберігання продуктів.

Таблиця 2.

Показник активності води ($n=3, p \leq 0.05$)

№ п/п	Найменування	Результати одиничних вимірювань a_{wn}	Середнє значення a_w
1	м'ясна сировина	0,327 0,325 0,325	0,326
2	ерінги 3800 Вт/м ² +60°C	0,422 0,424 0,421	0,422
3	ерінги 100/60°C	0,459 0,461 0,460	0,460
4	шіітаке 100/60°C	0,457 0,456 0,456	0,456
5	шіітаке 3800 Вт/м ² +60°C	0,423 0,425 0,424	0,424
6	глива 3800 Вт/м ² +60°C	0,430 0,428 0,430	0,429
7	глива 100/60°C	0,469 0,466 0,468	0,468

Вода у взаємодії з іншими макромолекулами харчових продуктів може викликати потемніння, окислення ліпідів і мікробне псування. Слід зазначити, що висока a_w має високий ризик мікробної атаки. Досліджували зміну активності води a_w для сушених культивованих грибів у формі порошку та м'ясної сировини у формі гранул (табл. 2). Показник активності води для досліджуваних зразків знаходиться в межах 0,5, яка не перевищує норму для розвитку мікроорганізмів.

У шостому розділі «Теплотехнологія отримання гранульованого м'яса, порошку із культивованих грибів, гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі м'яса, грибів, моркви та селери» було розроблено принципово-технологічні схеми та апаратурно-технологічні лінії для виробництва сухих білкововмісних продуктів.

Розробка сучасних теплотехнологій повинна вирішувати проблему раціонального використання одночасно сировинних, паливних та енергетичних ресурсів. Оскільки це має як науковий, так і соціальний аспект, тому що при цьому формуються основи раціонального харчування і відповідно підвищується якість життя. Основними умовами отримання якісного сухого продукту при розробці теплотехнології є підготовка сировини до технологічної переробки, оптимальні режими сушіння та збереження біологічно активних речовин.

Додавання сушеного м'яса до рецептур продуктів швидкого приготування дає можливість підвищити вміст білку в продукті з подальшим тривалим насиченням калоріями організму людини. То ж, розробка теплотехнології сушеного м'яса, культивованих грибів з метою застосування в рецептурі для продуктів швидкого приготування, матиме вплив як на енергетичну, так і на поживну цінність.

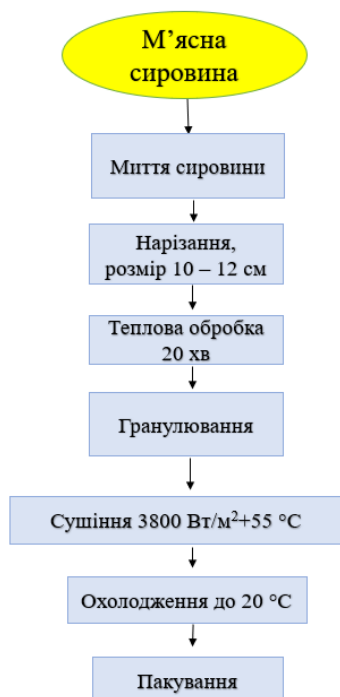


Рис. 32. Принципово-технологічна схема отримання сухого гранульованого м'яса із свинини або яловичини



33. Принципово-технологічна схема отримання грибного порошку із культивованих грибів ерінги або шийтаке, або глива звичайна, або печериця звичайна

Розроблена принципово-технологічна схема отримання гранульованого м'ясного порошку з м'яса свинини або яловичини, зображена на рис. 32, яка включає в себе стадію миття сировини, нарізання на шматки 10-12 см, далі відбувається теплова обробка протягом 20 хв, далі гранулювання з розміром 5 мм, сушіння за енергоефективним комбінованим способом $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55^\circ\text{C}$, охолодження до 20°C , пакування.

Технологічний процес отримання харчового грибного порошку з культивованих грибів складається з кількох основних етапів: миття та інспекція сировини, нарізання, сушіння за енергоефективних способів конвективного двоступеневого $100/60^\circ\text{C}$ або комбінованого $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$, охолодження до 20°C , пакування (рис. 33). Отриманий грибний порошок за розробленою теплотехнологією має світлий колір, без сторонніх домішок, яскравий виражений смак і аромат сушених грибів, властивий даній сировині.

Розроблений сушений гранульований м'ясний продукт шляхом додавання до м'ясного компоненту культивованих грибів, моркви і селери, які запобігають окисленню жирів та збільшують термін зберігання. Крім того, використання оптимальних температурних режимів під час сушіння сировини сприяють економії енергоносіїв і тим самим зменшують собівартість кінцевого продукту.

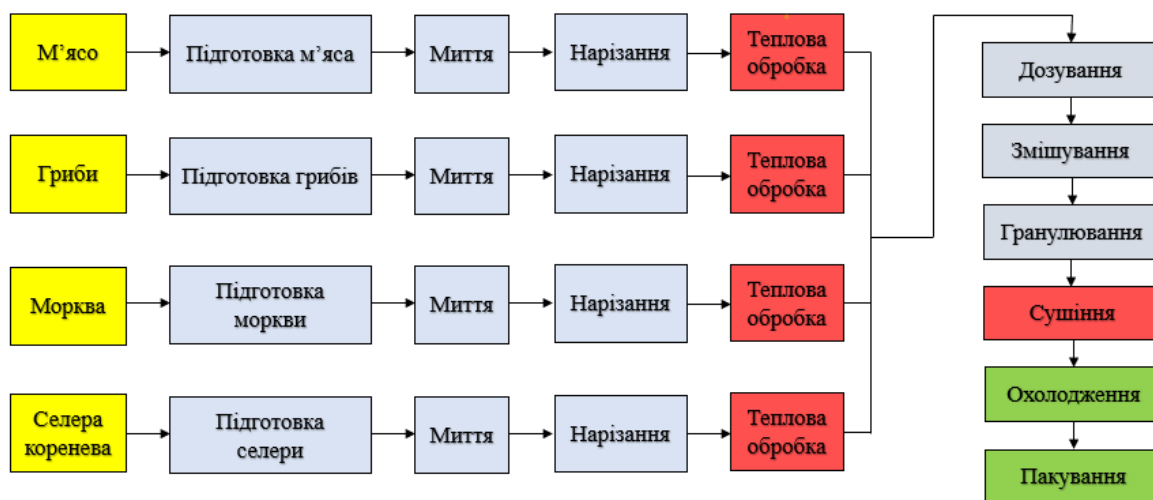


Рис. 34. Принципово-технологічна схема отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту

Принципово-технологічна схема отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту зображена на рис. 34, яка включає в себе підготовку м'ясної сировини (зачищення від плівки, жиру та прожилок), нарізання. Паралельно готують культивовані гриби, моркву та селеру, які попередньо миють, очищують від шкірки, нарізають на пластини 3×4 см, проварюють 1,5 – 2 хв, виймають з відвару та охолоджують, а в одержаний відвар у співвідношенні 2:1 кладуть шматочки 10×12 см м'ясної сировини.

Далі відбувається теплова обробка протягом 20 хв, змішування всіх компонентів у співвідношенні відварене м'ясо 60 %, гриби 20 %, морква 10 %, селера 10 %, далі подрібнення на гранули. Після цього продукт направляється на сушіння при ефективному режимі (рис. 34).

Поєднання м'яса із рослинною сировиною дає можливість запобігти окисленню жирів, при цьому покращуються органолептичні показники та збільшується харчова цінність продукту під час зберігання. Одержані сушені комбіновані гранули м'яса з грибами і рослинною сировиною чудово набухають та відновлюються під час його використання. Завдяки низькій температурі сушіння м'ясо не оплавляється, тому не має твердості. Такий продукт підходить для застосування як самостійно так і у рецептурі продуктів швидкого приготування.

Технологічні лінії для виробництва білкововмісної сировини представлені на рис. 35, 36, 37, які створені згідно розробленій технології та наведено їх технічну характеристику (табл. 3).

При розробці технологічної лінії виробництва сухих білкововмісних продуктів визначальним чинником продуктивності є потужність сушарки. Тому в таблиці 4 наведена технічна характеристика обладнання технологічних ліній для сушіння білкововмісної сировини. З таблиці видно, що виробництво по сировині становить 0,23-0,26 т/год, встановлена потужність 32-34 кВт та виробнича площа становить 320 м².

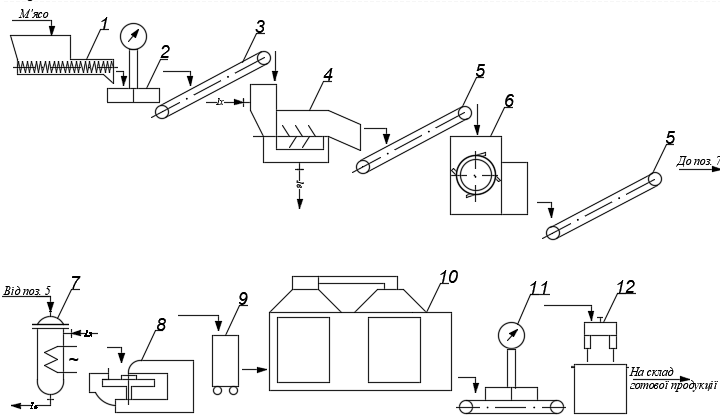


Рис. 35. Апаратурно-технологічна лінія виробництва м'ясного гранульованого порошку: 1 – бункер приймання сировини; 2 – ваги; 3 – транспортер елеваторний; 4 – машина миюча барабанна; 5 – конвеєр стрічковий; 6 – машина для нарізання сировини; 7- варильний котел; 8 – вовчок; 9 - візок з піддонами; 10 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина

Для застосування розроблених теплотехнологій отримання гранульованого м'ясного та грибного порошоків, а також гранульованого м'ясного продукту були розроблені лінії виробництва, які складаються із різних ділянок: підготовки сировини до зневоднення, сушіння, охолодження, подрібнення, сепарації, пакування та складу готової продукції.

Таблиця 3.
Технічна характеристика обладнання технологічних ліній

Найменування показників	Показник
Виробництво по сировині, т/год	0,23 – 0,25
Виробництво по сухому продукту, т/год	0,04 – 0,45
Виробництво по харчовому порошку, т/год	0,028 – 0,035
Встановлена потужність, кВт	32 – 34
Потреба пари чи палива (газу), не більше, т/год (м ³ /год)	30
Маса лінії, т	16 – 18
Виробнича площа, м ²	320
Орієнтовна вартість, тис. дол. США	230

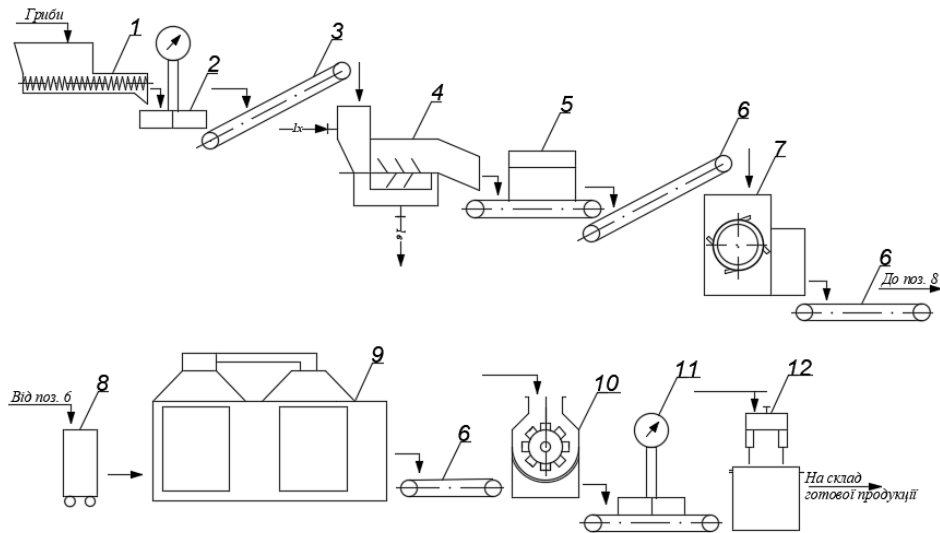


Рис. 36. Апаратурно-технологічна лінія виробництва грибного порошку:
 1 – бункер приймання сировини; 2 – ваги; 3 – транспортер елеваторний;
 4 – машина миюча барабанна; 5 – транспортер інспекційний з магнітним сепаратором; 6 – конвеєр стрічковий; 7- машина для нарізання сировини;
 8 – візок з піддонами; 9 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02;
 10 – молоткова дробарка; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина

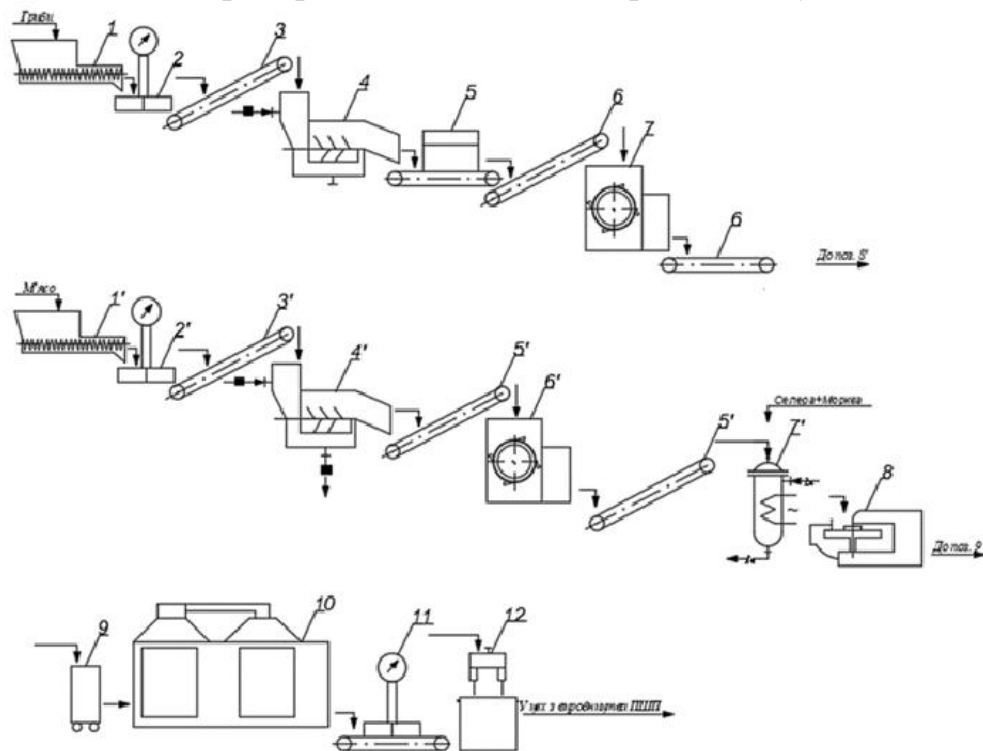


Рис. 37. Апаратурно-технологічна лінія виробництва сушеного гранульованого м'ясного продукту:

1, 1' – бункер приймання сировини; 2, 2' – ваги; 3, 3' – транспортер елеваторний ТЕ; 4, 4' – машина миюча барабанна; 5 - транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратором П-100; 5' – конвеєр стрічковий; 6 – конвеєр стрічковий; 6' - машина для нарізання м'яса; 7- машина для нарізання грибів; 7' - варильний котел; 8 – вовчок; 9 - візок з піддонами; 10 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина



Рис. 38. Співвідношення витрат на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів ерінги

Для малих фермерських господарств із застосуванням сушарки на 100 кг вихідної сировини було розраховано співвідношення витрат у відсотках на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів ерінги, що представлено на діаграмі (рис. 38). Основними статтями витрат є: на сировину 62,6 %, на заробітну плату 11,3 %. Затрати електроенергії при цьому становлять 14,3 %.

Очікуваний загальний річний економічний ефект від

впровадження теплотехнології отримання грибного порошку складає для культивованих грибів ерінги 947 904,68 грн при терміні окупності 8,2 міс.

Практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень та впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку.

ВИСНОВКИ

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили сформулювати принципи та методи інтенсифікації тепломасообмінних процесів під час сушіння білкововмісної сировини при виробництві сухих харчових продуктів з підвищеним вмістом білку. Наукове обґрунтування та реалізація процесів підготовки сировини, зневоднення та дослідження теплофізичних, сорбційних, регідратаційних властивостей, виконане чисельне моделювання процесу зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів надали можливість встановити оптимальні параметри та розробити нові технологічні схеми виробництва гранульованого м'ясного та грибного порошоків, а також гранульованого м'ясного продукту та довести їх енергоефективність. Ці дослідження дозволяють зробити загальні висновки по роботі:

1. Проаналізовано сучасний стан наукових та практичних розробок технологій переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження, який показав, що існує нагальна потреба у розробці ефективної теплотехнології отримання харчового білкововмісного продукту із максимальним збереженням біологічно активних речовин;

2. Розроблено попередню підготовку білкововмісної сировини тваринного походження до сушіння, а саме встановлено час гідротермічної обробки - 20 хв, яка в подальшому дозволить зменшити енерговитрати на процес сушіння;

3. Досліджено процеси зневоднення білкововмісних матеріалів тваринного та рослинного походження та розроблено ефективні режими - комбінований інфрачервоно-конвективний 3800 Вт/м²+55°C для м'ясної

сировини та комбінований інфрачервоно-конвективний $3800 \text{ Вт/м}^2+60^\circ\text{C}$ і конвективний двоступеневий $100/60^\circ\text{C}$ для культивованих грибів, які дозволяють зменшити тривалість процесу в 1,5-1,7 р. у порівнянні із режимом 60°C ;

4. Досліджено форму матеріалу та визначено, що зневоднення м'ясної сировини у вигляді гранул з діаметром 5 мм відбувається у 1,8 р швидше, ніж у вигляді кубиків $5 \times 5 \times 5$ мм;

5. *Вперше* визначено теплоту випаровування культивованих грибів, та доведено, що при зневодненні тканин гриба печериця істотно зростання енерговитрат на зневоднення відбувається вже на початкових етапах сушіння, досягає 11% перевищення понад табличним значенням для випаровування води з вільної поверхні до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості та різко збільшується при спробах сушіння за межу їх гігроскопічної вологості;

6. *Вперше* визначено теплоємність культивованих грибів в діапазоні температур $32,5 - 87,5^\circ\text{C}$. Отримано формули розрахунку теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця зі зміною їх вологості при різній температурі зразків. Значення теплоємності, розраховані за формулою достатньо добре (з середньою похибкою 2,12 %) співпадають з отриманими експериментальними даними;

7. Досліджено залежність критерію оптимізації сушіння від температури теплоносія, що обґрунтовує ефективність вибраних режимів сушіння;

8. Розраховано тривалість та швидкість зневоднення білкововмісної сировини для оптимального режиму 60°C ;

9. Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів показало, що у цілому порівняння результатів показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Розглянута розрахункова модель може використовуватися для наближеного визначення характеристик процесу сушіння сировини, зокрема часу, необхідного для сушіння;

10. Досліджено кінетику білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці. Доведено, що зміна напрямку потоку теплоносія на 120-ій хв дозволяє зменшити тривалість сушіння м'ясної сировини на 50 хв, або на 20 %.

11. Визначено, що при сушінні культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці із застосуванням розробленого комбінованого інфрачервоно-конвективного способу $3800 \text{ Вт/м}^2+60^\circ\text{C}$, відбувається інтенсифікація процесу на 25 % у порівнянні із режимом 60°C .

12. Розраховано енерговитрати на дослідно-промисловій камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія, які в середньому становлять 3800 кДж/кг випареної вологи, що значно менше, ніж в існуючих сушильних установках;

13. Визначено відновлюваність білкововмісної сировини після сушіння, яка переважає в 4-5 разів цей показник для нативної сировини, що свідчить про високу якість при сушінні за розроблених режимів;

14. Досліджено процеси подрібнення та диспергування сухих матеріалів, в результаті чого отримано порошок з культивованих грибів із високим відсотком оптимальної фракції менше 0,5 мм;

15. **Вперше** визначені рівноважні вологості білкововмісних матеріалів, висушених при ефективних режимах, в результаті чого отримані оптимальні умови їх зберігання;

16. Розроблені теплотехнології переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження із отриманням якісного гранульованого м'ясного та грибного порошку;

17. **Вперше** розроблена теплотехнологія отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування з м'яса, грибів, моркви та селери, який є основою для продуктів харчування з метою використання в екстремальних умовах населення, військовослужбовців та спортсменів.

18. Результати дисертаційної роботи передані до науково-дослідницького Інституту продовольчих ресурсів НААН для впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку та використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» для підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав та у виданнях України, що індексовані в міжнародних наукометричних базах даних (Scopus та Web of Science)

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Bessarab, O., **Samoilenko, K.**, Grakov, D., & Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 12 (3). 444-457. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-10>

2. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Vyshnievskiy, V., & Petrov, A. (2024). Adsorption properties of fast-food products. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32(4). 1030-1038. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>

3. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Vyshnevskiy, V., Petrov, P., & Koval I. (2024). The energy-efficient chamber dryer for drying meat products. *Food Science and Technology*. 18(4), 74-81. <https://doi.org/10.15673/fst.v18i4.3142>

4. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Slobodianiuk, K., Petrov, P. (2025). Drying of protein-carotene-containing raw materials based on carrot and fabaceae. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(2), 401-417 <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>

5. Sniezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Petrov, A.I., Biriukov, S.O. (2025). Energy-efficient low-temperature unit of condensation type for drying seed grain. *Energy Technologies & Resource Saving*, 82(1), 127-137. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.09>

6. Petrova, Z., Novikova, Y., Petrov, A., **Samoilenko, K.**, Golodryga, M. (2025). Peat processing into composite fuel. *Paliva*, 17(1), 13-19. <https://doi.org/10.35933/paliva.2025.01.03>
7. Sniezhkin, Y., Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Y., Vyshnievska, T. (2025). Research of sorption of composites based on municipal solid waste and biomass. *Vidnovluvana energetika*, 1(80), 159-167. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).159-167](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).159-167)
8. Sniezhkin, Yu., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Dakhnenko, V., Biriukov, S. (2025). Renewable energy sources in heat pumps for energy efficient low-temperature drying of seed grain. *Vidnovluvana energetika*, 2, 173-181 [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\)173-181](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81)173-181)
- Статті у наукових фахових виданнях України**
9. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., **Samoilenko, K.M.**, Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*, 6, 15-27. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.06.015>
10. Petrova Zh., **Samoilenko K.**, Vishnevsky V. (2020). Processes of heat and mass transfer during drying of red beetroot. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 81 – 87. <https://doi.org/10.23939/jeecs2020.02.081>
11. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., **Самойленко, К.М.** (2021). Комплексна енергоефективна теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіння томатів. *Scientific Works*, 85(1), 34-42. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i85.2239>
12. Petorva, Zh., **Samoilenko, K.** (2021). Adsorption Properties of Combined Vegetable Powders. *Energy Engineering and Control Systems*, 7(1), 38 – 47. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.01.038>
13. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P. (2022). Equilibrium humidity as one of important energy-efficiency indexes in drying of food powder materials of biological nature. *Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 90–97. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.090>.
14. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., **Samoilenko, K.**, Vishnevsky, V., Grakov O. (2022). Research of the kinetics of the drying process of combined plant materials. *Scientific Works*, 86(1), 69-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2406>
15. Петрова, Ж. О., Кузнєцова, І. В., **Самойленко, К.М.** (2023). Зниження енергоємності процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом застосування комбінованих методів сушіння на прикладі *Pleurotus Eryngii*. *Продовольчі ресурси*, 11(21), 141-148. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-14>
16. Давиденко, Б.В., **Самойленко, К.М.** (2024). Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(2), 42-51. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.5>
17. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., **Самойленко, К.М.**, Петров, П.І., Маноха, Д.О. (2025). Переробка білкововмісної рослинної сировини на сухий продукт. *Продовольчі ресурси*, 13(24), 33-44 <https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-03>

18. Petrova, Zh., *Samoilenko, K.* (2025). Research on convective drying of common oyster mushroom. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 67-74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.7>

Монографії

19. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., *Samoilenko, K.* (2021). *Blending and drying of antioxidant raw materials*. Monograph. LLC "Tvory", 107. ISBN 978-966-949-760-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/03/monografija2.1.pdf>

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., *Самойленко, К.М.*, Слободянюк, К.С. (2022). *Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків*. Монографія. Тропеа, 148. ISBN 978-617-789-60-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/09/monografija-teplomasoobminni-procesi-0.pdf>

Колективні монографії

21. Slobodianiuk K.S., *Samoilenko K.M.* (2020). Research of heat and mass transfer during convective drying of colloid capillary-porous materials. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science*. Riga, Latvia. "Baltija Publishing", 227-245. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-39>

22. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., Mykhailyk, V., Korinchevska, T., *Samoilenko, K.* (2023). Technological aspects of producing refuse derived fuel. TEC031000 Power Resources / General Publishing monograph indexed *Scopus* <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-02-3.ch3>, p. 76-105

23. Petrova, Zh. O., *Samoilenko, K. M.* (2024). Convective drying of Shiitake mushrooms with a focus on functionality and naturalness. *Responsible production and consumption: realization in new generations of food products: Scientific monograph*. Riga, Latvia. "Baltija Publishing", 266-282. ISBN 978-9934-26-445-0 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-11>

Охоронні документи

24. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., *Самойленко, К.М.*, Вишнівський, В.М., Петров, П.І. (2024). Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту (Заявка № а202405902). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

25. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., *Самойленко, К.М.*, Петров, А.І. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з грибів шіїтаке. (Заявка № а202406176 від 24.12.2024 р.). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

26. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., *Самойленко, К.М.*, Петров, П.І. (2025). Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування. (Заявка № а202500756). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

Тези доповідей та матеріали конференцій

27. *Самойленко, К.М.* (2021). Сучасні методи сушіння грибів шіїтаке (*lentinula edodes*). *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної*

- конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" КПІ ім. Ігоря Сікорського, 89-91.
28. Петрова ,Ж.О., **Самойленко, К.М.** (2021). Рівноважна вологість сухих продуктів швидкого приготування (горохово-морквяного супу-пюре). *Збірник тез доповідей XXIX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" КПІ ім. Ігоря Сікорського*, 30-33.
29. Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Novikova, Yu.P., Vyshnievska, T.A. (2022). Investigation of the adsorption properties of powder-form colloidal capillary-porous materials based carrot. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»*, 9-10.
30. Петрова Ж.О., **Самойленко К.М.**, Новікова Ю.П., Граков Д.П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Збірник тез: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології» Національний авіаційний університет* 76-78. <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.17168>
31. **Самойленко, К.М.** (2022). Адсорбційні властивості колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (5-7 грудня 2022 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*, 95-97.
32. Petrova, Zh., Novikova, Yu., **Samoilenko, K.**, Petrov, P. (2023). Adsorption studies of functional quick cooking products on the example of borsch. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Seoul-Vinnytsia: Case Co., Ltd. & European Scientific Platform, UDC001 (08)*. ISBN 978-617-8126-69-8. ISBN 978-89-5764-769-1 (PDF). 84-85.
33. **Самойленко, К.М.**, Пазюк, В.М. (2023). Енергоефективність в процесах сушіння при переробці колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 56.
34. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Slobodianiuk, K., Novikova, Yu. (2025). Adsorption research of pea puree soup. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC*, 143-145. <https://doi.org/10.36074/logos-04.04.2025.029>
35. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu. (2025). Effect of heat carrier temperature during convective drying of cultivated shiitake mushrooms. *The international conference food for life "Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy"*, 73-75.
36. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Yurchak, O. (2025). The Influence of Dehydration Mode on the Duration of the Drying Process of Protein-Containing Raw Materials of Animal Origin. *5th International Scientific Conference Chemical Technology and Engineering. Lviv, Ukraine*, 389-394.

37. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.** (2025). The influence of mode parameters on the drying duration of cultivated mushrooms. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»* Інститут технічної теплофізики НАН України, 49.

38. **Самойленко, К.М.**, Вишнівська, Т.А. (2025). Залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння м'яса свинини. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Інститут технічної теплофізики НАН України, 146.

39. Петрова, Ж., Дмитренко, Н., **Самойленко, К.** (2025). Теплота випаровування води із плодового тіла гриба печериці звичайної (*agaricus campestris*) при різних температурах. *Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сучасної теплоенергетики, присвячена 105-річчю від дня народження професора Драганова Бориса Харлампійовича*, 14-16.

40. Дмитренко, Н.В., Іванов, С.О., **Самойленко, К.М.** (2026). Вплив температури та зневоднення на питому теплоємність плодового тіла гриба печериця. *The 2nd International scientific and practical conference "Scientific development in a changing world" SPC "Sci-conf.com.ua"*, Lviv, Ukraine. 206-208. ISBN 978-966-8219-80-1

41. Дмитренко, Н.В., **Самойленко, К.М.** (2026). Специфіка видалення зв'язаної води з тканин плодового тіла гриба печериця звичайна при сушінні. *The 4th International scientific and practical conference "European science and innovation congress" Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain*. 157-159.

Особистий внесок здобувача у наукових роботах: розроблення методології досліджень проведення та постановка експериментів [1-15, 17-18, 21-23, 27-41], розроблення принципів чисельного моделювання [16, 19, 20], формування ідеї патенту, розроблення теплотехнології [24-26].

АНОТАЦІЯ

Самойленко К. М. Наукові засади створення енергоефективних теплотехнологій отримання білкововмісних продуктів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню процесу тепломасообміну при зневодненні білкововмісної сировини, розробці нових енергоефективних методів сушіння, а також створення теплотехнологій отримання білкововмісних продуктів з м'ясної сировини та культивованих грибів, а саме гранульованого м'ясного порошку, грибного порошку, гранульованого м'ясного продукту. Визначено теплофізичні параметри попередньої підготовки до сушіння, досліджено тепломасообмінні процеси при зневодненні білкововмісних матеріалів з урахуванням властивостей і режимів сушіння із подальшою розробкою енергоефективних режимів зневоднення. Визначено теплоту випаровування і теплоємність білкововмісної сировини. Розраховано залежність критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння. Виконано чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні. Досліджено сорбційні, регідратаційні властивості висушених білкововмісних порошків

тваринного та рослинного походження. Розраховано енерговитрати на дослідно-промисловій камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія. Розроблено енергозберігаючі теплотехнології для отримання порошків з білкововмісної сировини тваринного і рослинного походження та сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі м'яса, грибів, моркви та селери.

Ключові слова: тепломасобмін, кінетика, сушіння, регідратація, вологість, теплота випаровування, теплоємність, енергоефективність, м'ясо свинини та яловичини, культивовані гриби ерінги, шиїтаке, печериця, глива звичайна, сушарка на біомасі, комбінований нагрів, теплотехнологія, чисельне моделювання, математична модель, коефіцієнт дифузії, адсорбція.

ABSTRACT

Samoilenko K. M. Scientific principles of creating energy-efficient thermal technologies for obtaining protein-containing products. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.06 – "Technical thermal physics and industrial thermal power engineering", Institute of Engineering Thermophysics NAS Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to the study of the process of heat and mass transfer during dehydration of protein-containing raw materials, the development of new energy-efficient drying methods, as well as the creation of heat technologies for obtaining protein-containing products from meat raw materials and cultivated mushrooms, namely granulated meat powder, mushroom powder, granulated meat product. The thermophysical parameters of preliminary preparation for drying were determined, heat and mass transfer processes during dehydration of protein-containing materials were investigated, taking into account the properties and drying modes with the subsequent development of energy-efficient dehydration modes. The heat of vaporization and heat capacity of protein-containing raw materials were determined. The dependence of the drying optimization criterion on the moisture content of the material was calculated. Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying was performed depending on the drying mode parameters, the shape of the material and the recovery temperature. The sorption and rehydration properties of dried protein-containing powders of animal and plant origin were investigated. Energy consumption was calculated on a pilot-industrial chamber dryer with combined heating of the coolant. Energy-saving heat technologies were developed for obtaining powders from protein-containing raw materials of plant and animal origin and heat technology for a granulated instant meat product based on protein-containing powders.

Keywords: heat and mass transfer, kinetics, drying, rehydration, humidity, heat of vaporization, heat capacity, energy efficiency, pork and beef meat, cultivated eryngii mushrooms, shiitake, common champignon, common oyster mushroom, biomass dryer, combined heating, heat technology, numerical modeling, mathematical model, diffusion coefficient, adsorption.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.,
просп. Перемоги, 37
Київ, 03056

Підп. до друку 08.04.2026. Формат 60×84^{1/16}. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – ризографічний. Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 1,9. Наклад 55 пр.
Зам. № 26-023.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15
Київ, 03056
тел. (044) 204-81-78