

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТИСНЕННЯ ТА ТОВЩИНИ М'ЯСА НА ТРИВАЛІСТЬ КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОНТАКТНОМУ ГРИЛІ З ДВОСТОРОННІМ ПІДВЕДЕННЯМ ТЕПЛОТИ

В'ячеслав Скрипник

доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,
viacheslav.skrypnyk@pdaa.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8883-7398

Леонід Флегантов

кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,
leonid.flegantov@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4689-1457

Ярослав Бичков

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,
yaroslav.bychkov@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7559-127X

Богдан Пономаренко

здобувач вищої освіти, асистент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,
bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4047-1881

Кондуктивний спосіб сушіння є екологічно чистим методом консервування м'ясної сировини, що забезпечує збереження харчової цінності, низьку витрату енергії завдяки щільному контакту сировини з нагрівальною поверхнею. Високий уміст води у м'ясі сприяє покращенню контакту з нагрівальною поверхнею, забезпечуючи ефективний теплообмін. Щільний контакт м'яса з нагрівальними поверхнями можливо забезпечити за рахунок стиснення м'яса нагрівальними поверхнями, результатом чого є скорочення тривалості процесу зневоднення м'яса та зменшення витрати енергії. У статті представлені результати досліджень впливу режиму стиснення на протязі всього процесу зневоднення та режиму стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення води під час кондуктивного сушіння м'ясних дослідних зразків товщиною 0,003 м, 0,005 м та 0,007 м. Також автори досліджували вплив товщини м'ясних зразків на тривалість процесу сушіння. Дослідження проводилися на експериментальному стенді, розробленому у Полтавському державному аграрному університеті (ПДАУ). Було встановлено, що тривалість процесу кондуктивного сушіння більше скорочується в умовах стиснення на протязі інтенсивного видалення води. Дослідження включали проведення кореляційного аналізу для оцінки взаємозв'язку між стисненням та тривалістю процесу сушіння, а також між товщиною шару м'яса та тривалістю процесу сушіння. Перспективність сушіння м'ясної сировини кондуктивним способом підтверджується результатами цих досліджень, відповідно до яких стиснення, викликане масою навантаження на верхню нагрівальну поверхню, суттєво скорочує тривалість процесу кондуктивного сушіння і витрату енергії. Авторами також обґрунтовується різниця в скороченні тривалості процесу кондуктивного сушіння у проведених дослідженнях.

Ключові слова: кондуктивний, м'ясо, сушіння, стиснення, тривалість, товщина.

Актуальність роботи. Серед методів консервування, що застосовуються у харчовій промисловості, кондуктивне сушіння є належним для виготовлення сушеного м'яса, оскільки дає змогу досягти високої якості, зберегти харчову цін-

ність, одночасно мінімізуючи ризики розвитку мікроорганізмів. До переваг даного способу відносяться: щільний контакт продукту з нагрівальною поверхнею, проста конструкція обладнання; однорідність сушіння; коротка тривалість про-

цесу та ін., окремо розглянуті в роботі [1] шляхом систематизації даних та порівняння із рештою наявних способів та в інших наукових джерелах [2–10]. Застосування його доцільне з декількох причин. По-перше, цей спосіб забезпечує низьку витрату енергії і коротку тривалість процесу зневоднення, що робить його належним для виготовлення сушеного м'яса. По-друге, порівняно з рештою наявних способів [1], відомі конструкції обладнання не передбачають значних капітальних вкладень в організації такого процесу. Нарешті, вивченню процесу кондуктивного сушіння м'яса приділялося мало уваги, відсутність опублікованих сучасних результатів викликає необхідність у плануванні та проведенні низки експериментів. У попередніх дослідженнях вивчався цей процес в умовах стиснення, викликаного масою навантаження тільки верхньої плити [11]. Результати показали, що процес зневоднення є досить тривалим та енергозатратним. Пізніше в роботі [12] було висунуто гіпотезу: тривалість процесу кондуктивного сушіння м'яса можливо скоротити за рахунок примусового видалення вологи, зокрема стисненням м'яса нагрівальними поверхнями. У цій статті автори досліджують вплив стиснення м'яса нагрівальними поверхнями, експериментально підтверджуючи висунуту гіпотезу. Під час розроблення методик експериментів було враховано специфіку тепло- та масообмінних процесів, фізики фазових переходів, що відбувається у мікроскопічній структурі м'яса, особливості механізму видалення вологи, пароутворення та її виведення, а також характеристики м'ясної сировини.

Мета дослідження – провести аналіз впливу стиснення та товщини шару м'яса на тривалість процесу кондуктивного сушіння.

Матеріал і результати досліджень. Для проведення експериментальних досліджень авторами розроблено стенд (рис. 1), що знаходиться на кафедрі механічної та електричної інженерії інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету.

Стенд складається з електричного контактної грилю 2, що забезпечує двостороннє підведення теплоти верхньою і нижньою нагрівальними поверхнями. Регулювання температури зазначених поверхонь відбувається через прилад 5 «ТРЦ 02 Універсал плюс» і двох датчиків температури «рт 100», які введено у верхню та нижню нагрівальні поверхні грилю в точці, що відповідає геометричному центру кожної з поверхонь. Витрату електроенергії визначали за різницею показників

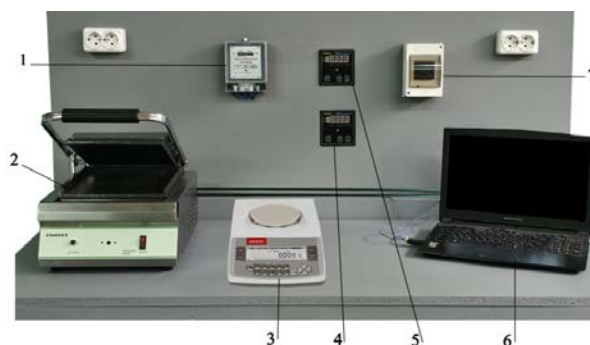


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенду: 1 – однофазний лічильник електроенергії «Cuprum S121H»; 2 – електричний контактний гриль; 3 – лабораторні ваги «Axis AD-600»; 4 – ТРЦ «02 Універсал плюс»; 5 – ТРЦ «02 Універсал плюс»; 6 – комп'ютер для реєстрації даних; 7 – монітор-лічильник «Smart-maic D101»

лічильника електроенергії 1 «Cuprum S121H». Початкову і кінцеву масу зразка визначали за допомогою аналітичних ваг «AXIS AD-600» 3 із точністю до 10^{-5} кг. Тривалість процесу кондуктивного сушіння фіксували за допомогою секундоміра. Температуру поверхневого шару дослідного зразка контролювали приладом «ТРЦ 02 Універсал плюс» 4 за рахунок 2 термопар ХК-0,5, спаї яких введено у поверхневий шар дослідного зразка. Монітор – лічильник електроенергії «Smart-maic D101» 7 надає можливість вимірювання, реєстрації та візуалізації зміни споживання електроенергії та параметрів електричної мережі за умов з'єднання з мережею Інтернет, зокрема через бездротове підключення Wi Fi.

Як сировину було вибрано найдовший м'яз свинини. Перед підготовкою зразків сировину ретельно очищали від жирових включень та плівок. Підготовлені дослідні зразки мали такі розміри: №1 – $0,07 \times 0,04 \times 0,003$ м масою 0,018 кг; №2 – $0,07 \times 0,04 \times 0,005$ м масою 0,020 кг; №3 – $0,07 \times 0,04 \times 0,007$ м масою 0,022 кг. Дослідження проводили з кожним зі зразків в умовах стиснення нагрівальними поверхнями, розігрітими до 130°C . Таку температуру вибрано з урахуванням необхідності запобігання утворенню канцерогенних сполук [13–18]. Стиснення здійснювали шляхом застосування гир масою 10 кг, 20 кг та 30 кг, розміщуючи їх на верхній нагрівальній поверхні електричного апарата. На початковому етапі це викликало утворення надлишкового тиску пари у поверхневому шарі зразків на рівні $p = 35,03$ кПа,

$p = 70,07$ кПа та $p = 105,12$ кПа відповідно. У процесі видалення вологи надлишковий тиск поступово зникав. Основним параметром, що впливав на стиснення, було вибрано сумарну масу навантаження, що включала масу верхньої нагрівальної поверхні електричного апарата та гир.

Спочатку здійснювали дослідження процесу кондуктивного сушіння м'яса в умовах стиснення на протязі всього процесу. У подальшому дослідження процесу зневоднення проводили в умовах стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи, що супроводжувалося в обох дослідженнях характерним звуком та послідовним виведенням пари в довкілля. Решту процесу продовжували в умовах стиснення, викликаного масою навантаження лише верхньої плити електричного грилю.

Дослідження за режиму стиснення м'яса нагрівальними поверхнями на протязі всього процесу проводили за такою методикою: дослідний зразок товщиною $\delta = 0,003$ м розміщували на нижній поверхні електричного апарата, завчасно розігрітій до $t = 130^\circ\text{C}$, вводили термопари у поверхневий шар зразка, після чого накривали верхньою поверхнею. На верхню поверхню одразу встановлювали гирі масою $G = 10$ кг, що створювало надлишковий тиск пари в поверхневих шарах зразка на рівні $p = 35,03$ кПа. Процес зневоднення тривав до того моменту, поки температура у поверхневому шарі м'яса досягала значення, рівного температурі нагрівальних поверхонь, тобто 130°C , а також поки було ледве чути характерний звук, що свідчило про наявність вологи, а точніше її кипіння, та візуальна видимість видалення цієї вологи у вигляді пари через поверхню м'яса. Після того як ці ознаки процесу зникали, процес кондуктивного сушіння м'яса зупиняли та діставали висушений зразок, даючи йому час для остигання. Після остигання зразок зважували на аналітичних вагах. Протягом процесу фіксували тривалість зневоднення, тривалість характерного звуку, температуру у поверхневому шарі м'яса та витрату енергії. Досліди проводили у триразовій повторюваності для того, щоб експериментально встановити та підтвердити момент завершення процесу кондуктивного сушіння м'яса, що базується на досягненні дослідним зразком постійної маси за ДСТУ ISO 1442:2005 [19]. Згідно зі стандартом, зразок досягає постійної маси, якщо різниця в масі між повторними зважуваннями не перевищує $0,001$ г. Це означає, що волога з м'яса видалена і його маса більше не зменшується.

Новий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м сушили за аналогічною методикою, але з використанням

гир масою $G = 20$ кг. За таких умов надлишковий тиск пари в поверхневих шарах зразка досягав $p = 70,07$ кПа.

Новий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м сушили за аналогічною методикою, але з використанням гир масою $G = 30$ кг. За таких умов надлишковий тиск пари в поверхневих шарах зразка досягав $p = 105,12$ кПа.

Сушіння дослідних зразків товщиною $\delta = 0,005$ м та $\delta = 0,007$ м проводилося за аналогічною методикою.

Дослідження за режиму стиснення м'яса нагрівальними поверхнями на протязі періоду інтенсивного видалення вологи проводилися за такою методикою: завчасно розігрівши нагрівальні поверхні електричного апарата до температури $t = 130^\circ\text{C}$, зразок товщиною $\delta = 0,003$ м розміщували на нижній його поверхні, вводили у поверхневий шар термопари і накривали верхньою поверхнею, після чого на неї встановлювали гирі масою $G = 10$ кг, що забезпечувало утворення надлишкового тиску пари в поверхневому шарі зразка на рівні $p = 35,03$ кПа. На початковому етапі процесу спостерігалось інтенсивне випаровування, що супроводжувалося характерним гучним звуком. Коли звук різко слабшав, а виділення пари ставало малопомітним і повільним, гирі знімали і продовжували процес в умовах стиснення, викликаного лише масою верхньої плити електричного апарата. Сушіння завершували, коли температура поверхневого шару зразка досягала $t = 130^\circ\text{C}$, а процес більше не супроводжувався звуковими ефектами чи видимим виділенням пари.

Протягом процесу фіксували тривалість зневоднення, тривалість характерного звуку, температуру у поверхневому шарі м'яса та витрату енергії. Аналогічно початковим дослідженням дослід проводили у триразовій повторюваності з метою отримання достовірних даних, а також експериментального встановлення та підтвердження моменту закінчення процесу сушіння, що полягав у досягненні дослідним зразком постійної маси відповідно до ДСТУ ISO 1442:2005 [19].

Новий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м досліджували за тією ж методикою, використовуючи гирі масою $G = 20$ кг. Це спричиняло утворення надлишкового тиску пари в поверхневих шарах зразка на рівні $p = 70,07$ кПа.

Новий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м досліджували за тією ж методикою, використовуючи гирі масою $G = 30$ кг. Це спричиняло утворення надлишкового тиску пари в поверхневих шарах зразка на рівні $p = 105,12$ кПа.

Сушіння дослідних зразків товщиною $\delta = 0,005$ м та $\delta = 0,007$ м проводилося за аналогічною методикою.

У результаті проведених експериментальних досліджень за режиму стиснення на протязі всього процесу зафіксовано такі показники процесу (табл. 1).

Результати цих досліджень разом із результатами досліджень, що проводилися в умовах стиснення, створеного масою навантаження лише верхньої плити [11], дають змогу отримати графічну залежність тривалості процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків від стиснення, яка наведена на рис. 2.

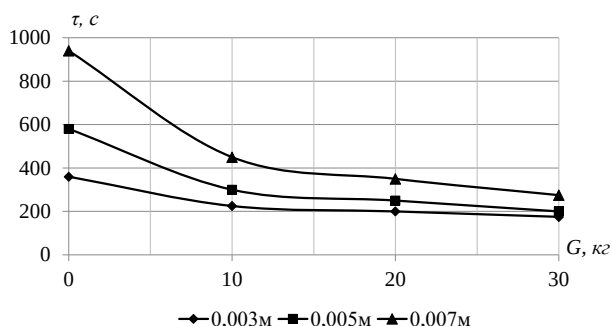


Рис. 2. Залежність тривалості процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків від стиснення на протязі всього процесу.

У результаті досліджень за режиму стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи зафіксовано такі показники процесу (табл. 2).

За результатами цих досліджень разом із результатами досліджень, що проводилися в умовах стиснення, створеного масою навантаження лише верхньої плити [11], отримано графічну залежність тривалості процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків від стиснення, яка наведена на рис. 3.

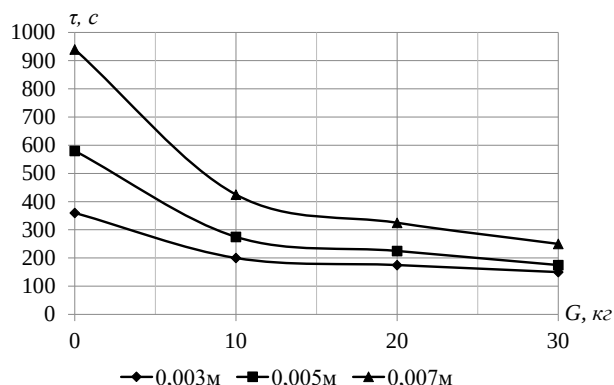


Рис. 3. Залежність тривалості процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків від стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи

Таблиця 1

Результати досліджень за режиму стиснення на протязі всього процесу

Найменування показника	Стиснення зразка товщиною 0,003 м, кг			Стиснення зразка товщиною 0,005 м, кг			Стиснення зразка товщиною 0,007 м, кг		
	10	20	30г	10	20	30	10	20	30
Тривалість, с	225	200	175	300	250	200	450	350	275
Тривалість характерного звуку	122	97	72	151	123	101	173	147	121
Маса висушеного зразка, кг	0,0058	0,0039	0,0029	0,0064	0,0047	0,0035	0,0067	0,0049	0,0038
Питома витрата енергії, кВт·год./1 кг випареної вологи	0,57	0,48	0,46	0,58	0,52	0,49	0,67	0,54	0,52

Таблиця 2

Результати досліджень за режиму стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи

Найменування показника	Стиснення зразка товщиною 0,003 м, кг			Стиснення зразка товщиною 0,005 м, кг			Стиснення зразка товщиною 0,007 м, кг		
	10	20	30г	10	20	30	10	20	30
Тривалість, с	200	175	150	275	225	175	425	325	250
Тривалість характерного звуку, с	122	97	72	151	123	101	173	147	121
Маса висушеного зразка, кг	0,0056	0,0041	0,0034	0,0061	0,0043	0,0032	0,0062	0,0046	0,0035
Питома витрата енергії, кВт·год./1 кг випареної вологи	0,48	0,4	0,39	0,49	0,44	0,41	0,56	0,45	0,44

За результатами досліджень було проведено кореляційний аналіз для оцінки взаємозв'язку між стисненням і тривалістю сушіння (табл. 3) та між товщиною зразка і тривалістю сушіння (табл. 4).

Таблиця 3
Коефіцієнти парної лінійної кореляції між показниками величини надлишкового тиску та тривалості сушіння

Товщина зразка, м	$r_{\text{пр}}$, режим стиснення на протязі всього процесу	$r_{\text{пр}}$, режим стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи
0,003	-0,91191	-0,94137
0,005	-0,90222	-0,90628
0,007	-0,90145	-0,9195

Таблиця 4
Коефіцієнти парної лінійної кореляції між показниками величини товщини зразка та тривалості сушіння

Стиснення, кг	$r_{\text{дт}}$, режим стиснення на протязі всього процесу	$r_{\text{дт}}$, подальші дослідження
10	0,979686	0,960769
20	0,977222	0,98817
30	0,959113	0,988081

Проаналізуємо залежності, представлені на рис. 2. Графіки демонструють нелінійний характер: зі збільшенням стиснення G тривалість процесу τ помітно скорочується для всіх дослідних зразків. У межах $G = 0 \dots 10$ кг зменшення тривалості процесу τ більш виражене для всіх дослідних зразків. Це означає, що вплив навіть мінімального стиснення інтенсифікує процес сушіння. Так, для зразка товщиною 0,003 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного навантаженням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 135 с, тобто процес сушіння скоротився на 37,5%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг процес сушіння скорочується на 160 с, або на 44%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скоротився на 185 с, або на 51%. Для зразка 0,005 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного навантаженням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 280 с, тобто процес сушіння скоротився на 48%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг процес сушіння скорочується на 330 с, або на 56%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скоротився на 380 с, або на 65%. Для зразка 0,007 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного наванта-

женням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 490 с, тобто процес сушіння скоротився на 52%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг процес сушіння скорочується на 590 с, або на 62%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скоротився на 665 с, або на 70%.

Експериментальні залежності, представлені на рис. 2, мають експоненційний характер. Для зразка товщиною $\delta = 0,003$ м з апроксимацією 0,8906 вона наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 325,28e^{-0,007G}, \quad (1)$$

де G – стиснення, викликане масою навантаження на верхню нагрівальну поверхню електричного апарата, кг.

Для зразка товщиною $\delta = 0,005$ м із апроксимацією 0,8997 наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 502,71e^{-0,01G} \quad (2)$$

Для зразка товщиною $\delta = 0,007$ м із апроксимацією 0,9060 наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 803,68e^{-0,012G} \quad (3)$$

Проаналізуємо тепер залежності, представлені на рис. 3. Аналогічно до початкових досліджень, криві мають нелінійний характер. Для всіх дослідних зразків спостерігається скорочення тривалості сушіння за збільшення стиснення G . У межах $G = 0 \dots 10$ кг зменшення тривалості процесу τ більш виражене для всіх дослідних зразків. Це вказує на те, що навіть мінімальне стиснення ($G = 10$ кг) інтенсифікує процес сушіння. Товстіші зразки мають більшу тривалість процесу сушіння за будь-якого значення стиснення G . Це логічно, оскільки товстіші зразки містять більше вологи, яка потребує більше часу для її видалення. Зокрема, для зразка товщиною 0,003 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного навантаженням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 160 с, тобто процес сушіння скоротився на 44%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг процес сушіння скорочується на 185 с, або на 51%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скорочується на 210 с, або на 58%. Для зразка 0,005 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного навантаженням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 305 с, тобто процес сушіння скоротився на 52%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг

процес сушіння скорочується на 355 с, або на 61%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скорочується на 405 с, або на 69%. Для зразка 0,007 м різниця у тривалості процесу в умовах стиснення, створеного навантаженням тільки верхньої поверхні [11] та зі стисненням $G = 10$ кг, становила 515 с, тобто процес сушіння скоротився на 55%. Зі збільшенням стиснення до $G = 20$ кг процес сушіння скорочується на 615 с, або на 65%. Зі збільшенням стиснення до $G = 30$ кг процес сушіння скорочується на 690 с, або на 73%.

Залежності, представлені на рис. 3, також мають експоненційний характер. Для зразка товщиною $\delta = 0,003$ м з апроксимацією 0,9726 вона наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 330,16e^{-0,012G}, \quad (4)$$

де G – стиснення, викликане масою навантаження на верхню нагрівальну поверхню електричного апарата, кг.

Для зразка товщиною $\delta = 0,005$ м з апроксимацією 0,9425 наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 497,98e^{-0,012G} \quad (5)$$

Для зразка товщиною $\delta = 0,007$ м з апроксимацією 0,9655 наближено описується рівнянням виду:

$$\tau = 829,15e^{-0,017G} \quad (6)$$

Графічне порівняння результатів обох досліджень представлено на рис. 4.

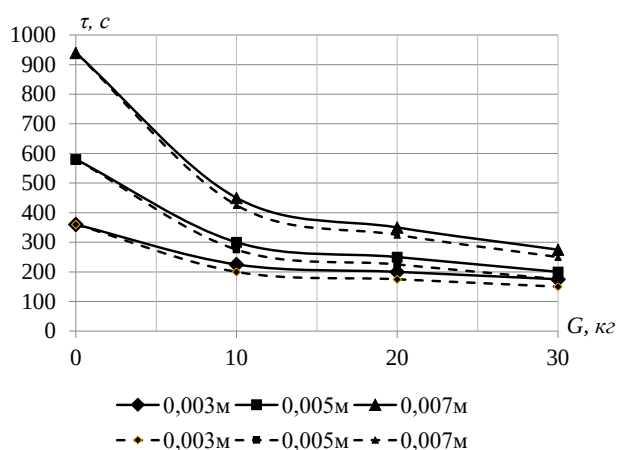


Рис. 4. Графічне порівняння отриманих результатів

Із рис. 4 видно, що графіки, що відповідають дослідженням за режимом стиснення на протязі

періоду інтенсивного видалення вологи, демонструють більше скорочення тривалості сушіння дослідних зразків. Найсуттєвіше скорочення спостерігається в обох дослідженнях за максимального стиснення $G = 30$ кг.

Результати експериментальних досліджень демонструють суттєве зменшення витрати енергії під час кондуктивного сушіння м'яса. У дослідженнях за режимом стиснення на протязі всього процесу витрата енергії знизилася на 56% для зразка товщиною $\delta = 0,003$ м, на 54% – для зразка товщиною $\delta = 0,005$ м та на 52% – для зразка товщиною $\delta = 0,007$ м. У дослідженнях за режимом стиснення на протязі інтенсивного видалення вологи досягнуто ще більших результатів: витрата енергії зменшилася на 63% для зразка $\delta = 0,003$ м, на 62% – для зразка $\delta = 0,005$ м та на 60% – для зразка $\delta = 0,007$ м. Таким чином, удосконалена методика, на якій засновано дослідження, проведені за режимом стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи, забезпечує додаткове скорочення витрати енергії на 7–8%.

Проведений кореляційний аналіз показав наявність сильного негативного лінійного кореляційного зв'язку між значенням стиснення G та тривалістю сушіння τ в обох дослідженнях (табл. 3), а також наявність сильного позитивного кореляційного зв'язку між значенням товщини дослідного зразка δ та тривалістю сушіння τ в обох дослідженнях (табл. 4). Можна стверджувати, що зі збільшенням стиснення у межах $G = 10 \dots 30$ кг тривалість сушіння τ зменшується. Зі збільшенням товщини м'яса у межах $\delta = 0,003 \dots 0,007$ м тривалість сушіння τ збільшується.

Класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом, що є результатом колективних зусиль багатьох учених і дослідників [20; 21], визначає основні форми зв'язку вологи з матеріалом, відповідно до якої хімічно зв'язану вологу та фізико-хімічно зв'язану вологу видалити складно або практично неможливо. Натомість видалити можливо механічно зв'язану вологу, що включає у себе капілярну і вільну вологу. Саме цей вид вологи і варто видаляти зі структури м'яса, інтенсифікуючи процес кондуктивного сушіння стисненням. У дослідженнях за режимом стиснення на протязі всього процесу обмежується дифузійна поверхня для виведення пари в довкілля. Установлено, що під час періоду нагрівання та інтенсивного видалення вологи (перший період) стиснення інтенсифікує процес сушіння. У подальшому за рахунок ущільнення

структури м'яса нагрівальними поверхнями площа поверхні м'яса, через яку фізико-хімічно зв'язана волога виводиться в довкілля у вигляді пари, лишається незначною, що призводить до ускладнення її виведення. У дослідженнях за режиму стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи стиснення чинило вплив на дослідний зразок на протязі періоду нагрівання та періоду інтенсивного видалення вологи (першого періоду), який визначали за характерним звуком та візуальною видимістю видалення пари. Після того як зазначений вид вологи видалявся, вагові гирі з верхньої плити прибирали, тим самим збільшуючи дифузійну поверхню для виведення пари, що призвело до додаткового скорочення тривалості процесу сушіння. Це пояснюється так: після того як у структурі м'яса залишається все менше вологи, тиск пари в порах та капілярах знижується. Це означає, що виведення пари в довкілля сповільнюється. Якщо у дослідженнях за режиму стиснення на протязі всього періоду в кінці першого періоду пара виводилася тільки через бічні поверхні в умовах стиснення, то в дослідженнях за режиму стиснення на протязі періоду інтенсивного видалення вологи пара виводилася по всій поверхні м'яса за рахунок збільшення поверхні для дифузії. Найкоротша тривалість процесу виявилась у зразка товщиною 0,003 м. Максимальна інтенсифікація досягалась за стиснення $G = 30$ кг, що додатково скорочує процес кондуктивного сушіння м'яса на 3...7%.

Висновки. На основі результатів проведених експериментальних досліджень та їх аналізу встановлено таке: зі збільшенням стиснення, викликаного масою навантаження на верхню нагрівальну поверхню в межах $G = 10...30$ кг, тривалість процесу кондуктивного сушіння м'яса τ скорочується, а витрата енергії зменшується. Товстіші зразки потребують більше часу та енергії для сушіння, проте видалення вологи з них також є більш інтенсивним. Стиснення, створене масою навантаження G на верхню нагрівальну поверхню, інтенсифікує процес кондуктивного сушіння м'яса. Установлено, що максимальна інтенсифікація досягається за стиснення $G = 30$ кг під час прогріву та періоду інтенсивного видалення вологи (перший період). Подальше сушіння в умовах стиснення лише збільшує тривалість процесу τ , тому є недоцільним. У період спадаючої швидкості сушіння (другий період) доцільно забезпечити максимальну площу поверхні м'яса для виведення пари в довкілля.

У перспективі майбутніх досліджень планується розроблення та створення апарату для кондуктивного сушіння м'яса, який буде забезпечувати оптимальні умови сушіння, визначені на основі проведених експериментальних досліджень. Особлива увага приділятиметься конструктивним особливостям такого обладнання, зокрема механізму регулювання стиснення, можливості точного підтримання заданої температури нагрівальних поверхонь та адаптивності до різних товщин і типів м'яса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скрипник В.О., Пономаренко Б.Г. Можливість використання наявних способів для сушіння жареного м'яса. *Вісник ПДАА*. 2022. № 2. С. 287–295.
2. Hnin K.K., Zhang M., Mujumdar A.S., Zhu Y. Emerging food drying technologies with energy saving characteristics: a review. *Drying Technology*. 2018. Vol. 37, No 12. P. 1465–1480.
3. Acar C., Dincer I., Mujumdar A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. *Drying Technology*. 2020. Vol. 40, No 6. P. 1029–1050.
4. Aksoy A., Karasu S., Akcicek A., Kayacan S. Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*. 2019. Vol. 8, No 6. P. 216.
5. Hayashi H. Drying technologies of foods -their history and future. *Drying Technology*. 1989. Vol. 7, No 2. P. 315–369.
6. Izli N., Izli G., Taskin O. Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple. *CyTA - Journal of Food*. 2018. Vol. 16, No 1. P. 213–221.
7. Erbay Z., Icier F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2010. Vol. 50, No. 5. P. 441–464.
8. Llavata B., Garcia-Perez J. V., Simal S., Carcel J. A. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current opinion in food science*. 2019. Vol. 35. P. 20–261.
9. Baker C.G.J. Energy efficient dryer operation – an update on developments. *Drying Technology*. 2005. Vol. 23, No 9–11. P. 2071–2087.
10. Kudra T., Mujumdar A. S. *Advanced Drying Technologies*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 432 p.
11. Viacheslav O. Skrypnyk, Anatolii O. Semenov, Bogdan H. Ponomarenko, Andrii H. Farisieiev. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2024. Vol. 32, No 1. P. 89–98.
12. Skrypnyk V.O., Ponomarenko B.G. Analytical justification of the conductive drying process of meat. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2024. Vol 2, No 56. P. 79–85.

13. Molognoni L., Daguer H., Motta G.E., Merlo T.C., Lindner J.D. Interactions of preservatives in meat processing: formation of carcinogenic compounds, analytical methods, and inhibitory agents. *Food research international*. 2019. Vol. 125.
14. Domingo J.L., Nadal M. Carcinogenicity of consumption of red meat and processed meat: a review of scientific news since the IARC decision. *Food and chemical toxicology*. 2017. Vol. 105. P. 256–261.
15. Aykan N.F. Red meat and colorectal cancer. *Oncology reviews*. 2015. Vol. 9, No 1. 288.
16. Kurek M., Hanula M., Wierzbicki A., Poltorak A. Formation of carcinogens in processed meat and its measurement with the usage of artificial digestion – a review. *Molecules*. 2022. Vol 27, No 14.
17. Cross A.J., Sinha R. Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2004. Vol 44, No1. P. 44–55.
18. Sugimura T., Wakabayashi K., Nakagama H., Nagao M. Heterocyclic amines: mutagens/carcinogens produced during cooking of meat and fish. *Cancer Science*. 2004. Vol. 95, No 4. P. 290–299.
19. ДСТУ ISO 1442:2005. М'ясо та м'ясні продукти. Метод визначення вмісту вологи (контрольний метод) (ISO 1442:1997, IDT). [Чинний від 2008-03-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 9 с.
20. Barbosa-Canovas G.V., Fontana A.J.Jr., Schmidt S.J., Labuza T.P. Water activity in foods: fundamentals and applications. Ames: Blackwell Publishing, 2007. 439 p.
21. Ratti C. Advances in food dehydration. Boca Raton: CRC Press, 2009. 467 p.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF COMPRESSION AND MEAT THICKNESS ON THE DURATION OF CONDUCTIVE DRYING IN AN ELECTRICAL APPARATUS WITH DOUBLE-SIDED HEAT SUPPLY

Viacheslav Skrypnyk

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering

Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, viacheslav.skrypnyk@pdaa.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8883-7398

Leonid Flehantov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Information Systems and Technologies

Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, leonid.flehantov@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4689-1457

Yaroslav Bychkov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering

Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, yaroslav.bychkov@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7559-127X

Bogdan Ponomarenko

PhD student, Assistant at the Department of Mechanical and Electrical Engineering

Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, bogdan.ponomarenko@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4047-1881

Purpose. The conductive drying method is an environmentally friendly approach to preserving meat products, ensuring the retention of nutritional value and low energy consumption due to the close contact between the material and the heating surface. Research has been conducted to analyze the impact of compression applied throughout the entire dehydration process and compression limited to the period of intensive moisture removal during the conductive drying of meat samples with thicknesses of 0.003 m, 0.005 m, and 0.007 m. Additionally, to evaluate the effect of meat sample thickness on the duration of the drying process.

Methodology. The study employed the following methods: a literature review to collect information from scientific articles, monographs, dissertations, conference proceedings, patents, and other sources related to existing methods of drying food raw materials, particularly meat; comparative analysis to evaluate the advantages and disadvantages of these drying methods; an experimental method, with research conducted on a test bench developed at Poltava State Agrarian University (PDAU), examining the effects of compression applied throughout the entire dehydration process and during

the period of intensive moisture removal; and correlation analysis to assess the relationships between compression and drying duration, as well as between the thickness of meat samples and the drying duration.

Findings. It was established that compression intensifies the process of conductive meat drying: as compression increases within the range of 10 to 30 kg, the drying duration decreases, and energy consumption is reduced. Maximum intensification is achieved with a compression of 30 kg applied during the heating phase and the period of intensive moisture removal (first stage). In the second stage, it is advisable to release the meat surface to facilitate the removal of residual moisture as vapor into the environment. The authors also substantiate the observed variations in the reduction of the drying duration in the conducted experiments.

Originality. This study is the first to analyze the impact of compression regimes: one applied throughout the entire process and the other limited to the period of intensive moisture removal, providing valuable insights into the potential for intensifying the conductive drying process of meat

Practical value. Based on the results, the development and creation of a conductive meat drying apparatus are planned, which will provide drying conditions determined by the experimental research conducted.

Conclusions. It was experimentally established that the improved methodology, upon which the research is based, using the compression regime during the period of intensive moisture removal, results in an additional reduction of the process duration by 3-7% and energy consumption by 7-8%.

Key words: conductive, meat, drying, compression, duration, thickness.

REFERENCES

1. Skrypnyk, V., & Ponomarenko, B. (2022). Mozhlyvist vykorystannia naiavnykh sposobiv dlia sushinnia zharenoho miasa [The possibility of applying of existing methods for the fried meat drying process]. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (2), 287–295. DOI: 10.31210/visnyk2022.02.34 [in Ukrainian].
2. Khaing Hnin, K., Zhang, M., Mujumdar, A.S., & Zhu, Y. (2018). Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review. *Drying Technology*, 37 (12), 1465–1480. doi: 10.1080/07373937.2018.1510417.
3. Acar, C., Dincer, I., & Mujumdar, A. (2020). A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. *Drying Technology*, 40 (6), 1029–1050. DOI: 10.1080/07373937.2020.1848858.
4. Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*, 8 (6), 216. doi: 10.3390/foods8060216.
5. Hayashi, H. (1989). Drying technologies of foods – their history and future. *Drying Technology*, 7 (2), 315–369. doi: 10.1080/07373938908916590.
6. Izli, N., Izli, G., & Taskin, O. (2018). Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple. *CyTA – Journal of Food*, 16 (1), 213–221. DOI: 10.1080/19476337.2017.1381174
7. Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. DOI: 10.1080/10408390802437063.
8. Llavata, B., García-Pérez, J.V., Simal, S., & Cárcel, J.A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. doi: 10.1016/j.cofs.2019.12.001
9. Baker, C.G.J. (2005). Energy efficient dryer operation – an update on developments. *Drying Technology*, 23 (9–11), 2071–2087. DOI: 10.1080/07373930500210556
10. Kudra, T., & Mujumdar, A.S. (2009). *Advanced Drying Technologies*. Boca Raton, FL: CRC Press.
11. Skrypnyk, V.O., Semenov, A.O., Ponomarenko, B.H., & Farisieiev, A.H. (2024). Mechanizm of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32(1), 89–98. DOI: 10.15421/jchemtech.v32i1.285130.
12. Skrypnyk, V.O., & Ponomarenko, B.G. (2024). Analytical justification of the conductive drying process of meat. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2 (56), 79–85. DOI: 10.32782/msnau.2024.2.11 [in Ukrainian].
13. Molognoni, L., Daguer, H., Motta, G.E., Merlo, T.C., & Lindner, J.D. (2019). Interactions of preservatives in meat processing: formation of carcinogenic compounds, analytical methods, and inhibitory agents. *Food research international*. 125, 108608. DOI : 10.1016/j.foodres.2019.108608.
14. Domingo, J.L., & Nadal, M. (2017). Carcinogenicity of consumption of red meat and processed meat: a review of scientific news since the IARC decision. Food and chemical toxicology. 105, 256–261. DOI : 10.1016/j.fct.2017.04.028.
15. Aykan, N.F. (2015). Red meat and colorectal cancer. *Oncology reviews*, 9(1), 288. DOI : 10.4081/oncol.2015.288.
16. Kurek, M., Hanula, M., Wierzbicka, A., & Póltorak, A. (2022). Formation of carcinogens in processed meat and its measurement with the usage of artificial digestion – a review. *Molecules*, 27 (14), 4665. DOI: 10.3390/molecules27144665.
17. Cross, A.J., & Sinha, R. (2004). Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 44(1), 44 – 55. DOI: 10.1002/em.20030.
18. Sugimura, T., Wakabayashi, K., Nakagama, H., & Nagao, M. (2004). Heterocyclic amines: Mutagens/carcinogens produced during cooking of meat and fish. *Cancer Science*, 95(4), 290–299. DOI: 10.1111/j.1349-7006.2004.tb03205.x.
19. International Organization for Standardization. (2023). Meat and meat products – Determination of moisture content (Reference method). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/82664.html>.
20. Barbosa-Canovas, G.V., Fontana, A.J., Schmidt, S.J., & Labuza, T.P. (2008). Water activity in foods: Fundamentals and applications. Blackwell Publishing. DOI: 10.1002/9780470376454.
21. Ratti, C. (2009). *Advances in food dehydration*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Стаття надійшла 17.11.2024