

УДК 664.921

Скрипник В. О.

доктор технічних наук,
професор кафедри механічної та електричної інженерії,
Полтавський державний аграрний університет
Полтава, Україна
E-mail: viacheslav.skrupnyk@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8883-7398

Пономаренко Б. Г.

аспірант,
асистент кафедри механічної та електричної інженерії,
Полтавський державний аграрний університет
Полтава, Україна
E-mail: bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4047-1881

РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИКИ ВОЛОГОВМІСТУ І ТЕМПЕРАТУРИ В М'ЯСІ ЗА КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ ІЗ СТИСНЕННЯМ

Анотація

Важливішими задачами сучасної харчової промисловості, зокрема у сушінні харчової сировини, є збереження харчової цінності готового продукту та зниження енергетичних витрат. Кондуктивне сушіння вирішує такі завдання, але наразі досліджено недостатньо, що призводить до значного дефіциту наукових даних. Попит на продукти харчування з тривалим терміном зберігання, включно із сушеним м'ясом, особливо зростає в Україні через перебої з електропостачанням, викликані війною з росією. Це збільшує актуальність досліджень у цій галузі. Попередні дослідження переважно зосереджувалися на визначенні та аналізі кінетики вологовмісту та температури м'яса під час кондуктивного сушіння м'яса та не враховували стиснення самого м'яса. Залишилося невивченим, як стиснення може впливати на процес виведення вологи зі структури м'яса. У статті представлені результати експериментального дослідження кондуктивного сушіння сирого м'яса товщиною 0,003 м, 0,005 м і 0,007 м в умовах двобічного підведення теплоти з температурою поверхонь нагрівання до 130°C за різної маси навантаження, що створювало надлишковий тиск пари у поверхневому шарі сировини. Авторами досліджено і визначено кінетику вологовмісту та температури в умовах стиснення з навантаженням, визначено раціональну товщину сировини, а якість готового продукту оцінювалась органолептичним способом за 5-бальною шкалою. Результати досліджень порівнювались з даними попереднього дослідження, в якому вивчався цей процес без навантаження на нагрівальну поверхню, що були опубліковані раніше. У результаті було встановлено, що сушіння в умовах стиснення з навантаженням дає змогу значно скоротити тривалість процесу та зменшити витрату енергії, при цьому якість готового продукту залишається високою. Апроксимація експериментальних кінетик вологовмісту і температури дала змогу розробити аналітичні моделі процесу у вигляді модифікованих експонент, що враховують товщину дослідного зразка і масу навантаження.

Ключові слова: кондуктивний, кінетика температури, кінетика вологовмісту, сушіння, м'ясо, стиснення, надлишковий тиск, навантаження.

Вступ. Серед наявних способів кондуктивне сушіння вирізняється суттєвими перевагами [3; 6; 11]. Назва «кондуктивне сушіння» походить від процесу кондукції, тобто теплопровідності, коли тепло передається безпосередньо від гарячої поверхні до продукту шляхом теплопровідності. Цей спосіб застосовується у харчовій промисловості для обробки м'яса, риби, овочів, фруктів, зернових культур, а також для виготовлення м'ясних напівфабрикатів, овочевих і фруктових концентратів [2; 3], даючи змогу досягти потрібного кінцевого вологовмісту і зберегти якісні органолептичні показники. За сушіння м'яса важливим параметром, що впливає на тривалість процесу та витрату енергії, є товщина шару. Особливий інтерес у дослідженнях викликає процес кондуктивного сушіння в умовах стиснення з навантаженням, що викликає надлишковий тиск пари у поверхневому шарі м'яса. Вплив стиснення на м'ясо може значно змінювати кінетику процесу, що, в свою чергу, позначається на якісних характеристиках готового продукту і показниках процесу. Нещодавні дослідження [16] виявили необхідність подальшого пошуку способів інтенсифікації процесу кондуктивного сушіння, зокрема шляхом стиснення м'яса нагрівальними поверхнями.

Мета роботи полягає у визначенні впливу величини стиснення м'яса під час процесу кондуктивного сушіння на кінетику вологовмісту та температури поверхневих шарів м'яса, якість сушеного м'яса за органолептичними показниками, а також визначення раціональної товщини м'яса.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення експериментальних досліджень використовувався стенд, розроблений на кафедрі механічної та електричної інженерії інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету (рис. 1).

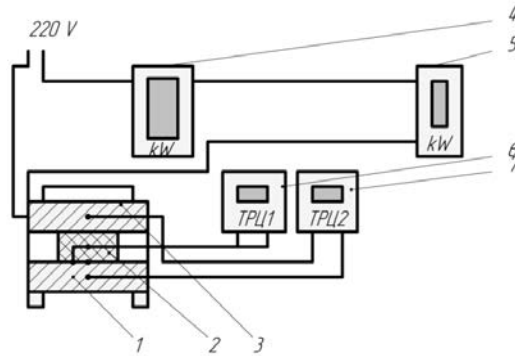


Рис. 1. Схема експериментального стенду для дослідження процесів кондуктивного сушіння м'яса

Примітка: 1 – нижня нагрівальна поверхня; 2 – верхня нагрівальна поверхня; 3 – дослідний зразок; 4 – однофазний лічильник електроенергії “Сиргум S121Н”; 5 – монітор-лічильник електроенергії “Smart-maic D101”; 6 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що визначає температуру дослідного зразка; 7 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що регулює температуру нижньої та верхньої нагрівальних плит

Стенд складається з модернізованого електричного контактного грилю “Frosty SP-1A3” (Італія), що забезпечує двостороннє підведення теплоти до дослідного зразка 3 нагрівальними поверхнями 1, 2. Регулювання температури зазначених поверхонь відбувається за допомогою приладу 7 «ТРЦ 02 Універсал плюс» і двох датчиків температури “pt 100”, які введено у верхню та нижню нагрівальні поверхні 1, 2 в точці, що відповідає геометричному центру кожної з поверхонь на глибину 0,00005 м від поверхні нагрівання. Витрата енергії фіксується за допомогою лічильника електроенергії 4 “Сиргум S121Н”, а також монітором-лічильником електроенергії “Smart-maic D101” 5, що надає можливість вимірювання, реєстрації та візуалізації зміни споживання електроенергії та параметрів електричної мережі. Маса дослідного зразка фіксувалася до і після сушіння за допомогою аналітичних ваг “AXIS AD-600” з точністю до 10^{-5} кг. Тривалість процесу кондуктивного сушіння фіксувалася за допомогою секундоміра. Температура на поверхні дослідного зразка контролювалася приладом 6 «ТРЦ 02 Універсал плюс» за рахунок 2 термопар ХК-0,5, спаї яких вводилися у поверхневий шар дослідного зразка.

Як сировину було придбано найдовший м'яз свинини у мережі магазинів «М'ясокомбінат м'ясний» (м. Полтава), з яких виготовили дослідні зразки, попередньо звільнивши сировину від жиру та плівок. Дослідні зразки відрізнялися за товщиною: № 1 – $0,07 \times 0,04 \times 0,003$ м; № 2 – $0,07 \times 0,04 \times 0,005$ м; № 3 – $0,07 \times 0,04 \times 0,007$ м. Дослідження проводили з кожним зразком в умовах стиснення нагрівальними поверхнями, розігрітими до температури 130°C . Температура нагрівальних поверхонь була вибрана таким чином, щоб запобігти виникненню негативних змін у м'ясі, зокрема утворенню гетероциклічних ароматичних амінів [5; 8–10; 13]. Стиснення реалізовували шляхом накладання гир масою 10 кг, 20 кг та 30 кг на верхню нагрівальну поверхню, що викликало утворення на початковому етапі надлишкового тиску пари у поверхневому шарі дослідних зразків $p = 35,03$ кПа, $p = 70,07$ кПа та $p = 105,12$ кПа відповідно. Надлишковий тиск у процесі видалення вологи поступово зникав, тому надалі було вирішено використовувати масу навантаження, що складалася з маси верхньої поверхні та гир масою 10 кг, 20 кг і 30 кг, за основний параметр, що впливав на стиснення м'яса.

Сирий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м зважували на аналітичних вагах, висушували його в сушильній шафі до постійної маси [1], після чого фіксували масу висушеного остиглого зразка на аналітичних вагах. Значення вологовмісту розраховували за формулою (без урахування маси чаші, піску і скляної палички):

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%,$$

де m_1 – маса дослідного зразка до висушування; m_2 – маса дослідного зразка після висушування.

Наступний сирий зразок товщиною $\delta = 0,003$ м розміщували на нижній поверхні контактної грилю, вводили у поверхневий шар термопари і накривали верхньою поверхнею, відразу накладаючи гирі вагою 10 кг на верхню поверхню. Через 25 с зразок діставали, фіксуючи при цьому значення температури у поверхневому шарі. Після остигання зразок зважували на аналітичних вагах і висушували у сушильній шафі до постійної маси з подальшим розрахунком значення вологовмісту. Далі дослідні зразки товщиною $\delta = 0,003$ м сушили, збільшуючи тривалість процесу кожного наступного з них на 25 с.

Таким чином, вдалося встановити тривалість процесу кондуктивного сушіння дослідного зразка товщиною $\delta = 0,003$ м в умовах стиснення, викликаного гирею масою $G = 10$ кг, зафіксувати значення температури у поверхневому шарі зразка протягом процесу та розрахувати значення вологовмісту. Значення кінцевого вологовмісту W_k , до якого висушувалися дослідні зразки, було вибрано 5%, що на графіку відповідає значенню нуль.

Для оцінювання якості висушеного виробу та визначення значення витрати енергії додатково було проведено сушіння зразків відповідно до встановленої тривалості процесу. Значення витрати енергії фіксували за

різницею показників лічильника електроенергії, а якість висушеного виробу оцінювали за розробленою 5-бальною шкалою, яка наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Бальна шкала визначення органолептичних показників висушених виробів

| Показник | 5 балів | 4 бали | 3 бали | 2 бали | 1 бал |
|------------------|---|--|-------------------------------------|--|--|
| Зовнішній вигляд | Однорідна поверхня, без деформації | Незначна деформація | Нерівні краї, тріщини | Суттєва деформація | Виріб безформний |
| Консистенція | Щільна, пружна, легко розжовується | Трохи суха, але пружна | Трохи жорстка або ламка | Жорстка або крихка | Дуже жорстка |
| Запах | Насичений, виразний аромат сушеного м'яса | Легкий, виразний аромат | Нейтральний, без вираженого аромату | Слабкий непріємний запах підгорілості | Різкий непріємний запах підгорілості |
| Смак | Насичений, приємний, без сторонніх присмаків | Присмний, але менш насичений | Ненасичений, слабовиражений | Слабовиражений з підгорілим присмаком | Насичений підгорілий присмак |
| Колір | Рівномірний коричневий або коричнево-червоний відтінок з легким блиском | Рівномірний коричневий або коричнево-червоний відтінок | Рівномірний світло-коричневий | Коричневий з темними ділянками, в тому числі по краях виробу | Темно-коричневий з чорними ділянками, в тому числі по краях виробу |

Всі дослідження проводили у триразовій повторюваності.

Новий дослідний зразок товщиною $\delta = 0,003$ м сушили за такою ж послідовністю з накладанням гир масою 20 кг.

Новий дослідний зразок $\delta = 0,003$ м сушили за такою ж послідовністю з накладанням гир масою 30 кг.

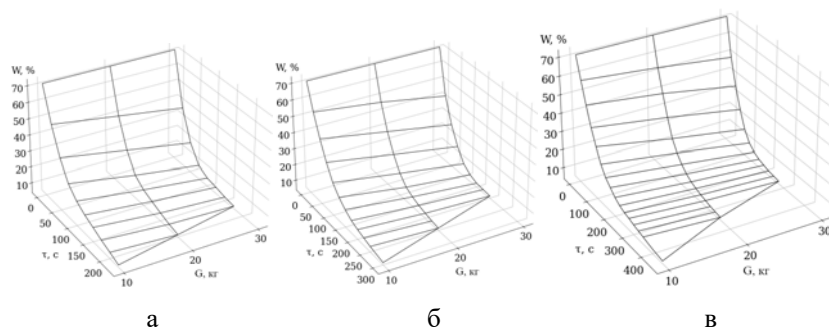
Сушіння дослідних зразків товщиною $\delta = 0,005$ м та $\delta = 0,007$ м проводилися за аналогічною методикою.

В результаті проведення досліджень були визначені значення вологовмісту та температури у поверхневому шарі, зафіксовано масу зразків до і після сушіння, кількість видаленої вологи, витрату енергії, тривалість процесу. Результати експериментального визначення зміни вологовмісту дослідних зразків зведено в табл. 2.

Таблиця 2. Вологовміст дослідних зразків

| τ, c | $\sigma_1 = 0,003$ м | | | $\sigma_2 = 0,005$ м | | | $\sigma_3 = 0,007$ м | | |
|-----------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг |
| 0 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 |
| 25 | 52 | 46 | 40 | 57 | 52 | 45 | 60 | 55,5 | 49 |
| 50 | 36 | 29 | 22 | 44 | 37 | 27 | 50 | 40 | 31 |
| 75 | 25 | 18 | 11 | 33 | 26 | 16 | 40 | 29 | 19 |
| 100 | 17 | 11,5 | 6 | 24 | 17,5 | 9 | 32 | 21 | 12,5 |
| 125 | 12 | 7,5 | 3 | 17,5 | 11 | 5 | 25 | 15 | 8 |
| 150 | 9 | 5 | 1,5 | 12,5 | 7,5 | 2,5 | 20 | 11 | 5,5 |
| 175 | 6 | 2,5 | 0 | 9,5 | 4,7 | 1 | 16,5 | 8 | 3,5 |
| 200 | 3 | 0 | | 7,5 | 3 | 0 | 14 | 6 | 2 |
| 225 | 0 | | | 5,5 | 1,5 | | 11,5 | 4,5 | 1,5 |
| 250 | | | | 3,5 | 0 | | 9,5 | 3 | 0,5 |
| 275 | | | | 1,5 | | | 8 | 2 | 0 |
| 300 | | | | 0 | | | 6,5 | 1 | |
| 325 | | | | | | | 5 | 0,5 | |
| 350 | | | | | | | 4 | 0 | |
| 375 | | | | | | | 3 | | |
| 400 | | | | | | | 2 | | |
| 425 | | | | | | | 1 | | |
| 450 | | | | | | | 0 | | |

Результати експериментального визначення зміни вологовмісту оброблялися за допомогою методів математичної статистики та кореляційного аналізу, внаслідок чого було визначено фактичну кінетику вологовмісту, графічно представлену на рис. 2.



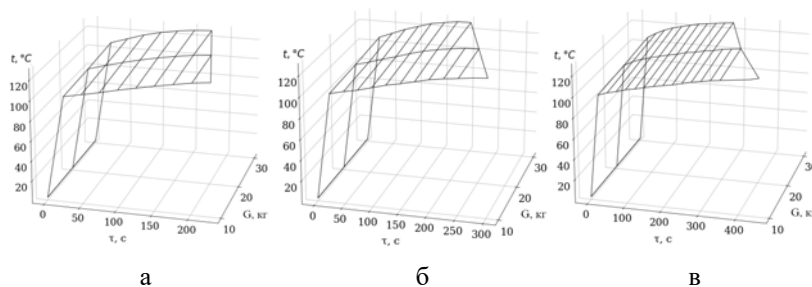
**Рис. 2. Фактична кінетика вологовмісту дослідних зразків
(а – товщина 0,003 м; б – товщина 0,005 м; в – товщина 0,007 м)**

Результати експериментального визначення зміни температури у поверхневому шарі дослідних зразків зведено в табл. 3.

Таблиця 3. Температура дослідних зразків

| τ, с | $\sigma_1 = 0,003 \text{ м}$ | | | $\sigma_2 = 0,005 \text{ м}$ | | | $\sigma_3 = 0,007 \text{ м}$ | | |
|------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг |
| 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 25 | 103 | 105 | 108 | 102 | 104 | 107 | 101 | 103 | 106 |
| 50 | 106,5 | 110 | 113,5 | 105 | 107,5 | 112 | 103 | 108 | 112 |
| 75 | 110 | 114,5 | 119 | 107,5 | 111,5 | 117 | 105 | 110,5 | 116 |
| 100 | 114 | 118,5 | 123 | 111 | 115 | 121 | 107,5 | 113 | 119 |
| 125 | 117,5 | 122 | 126 | 114,5 | 119 | 125 | 109 | 115 | 121 |
| 150 | 121 | 125 | 128 | 117 | 122,5 | 127 | 111 | 117 | 123 |
| 175 | 124 | 127,5 | 129 | 120 | 125 | 128 | 112,5 | 118,5 | 124 |
| 200 | 127 | 129 | | 123 | 127 | 129 | 114,5 | 121 | 126 |
| 225 | 129 | | | 126,5 | 128,5 | | 116 | 122 | 127 |
| 250 | | | | 126 | 129 | | 118 | 124 | 128 |
| 275 | | | | 128 | | | 120 | 125 | 129 |
| 300 | | | | 129 | | | 121,5 | 127 | |
| 325 | | | | | | | 123 | 128 | |
| 350 | | | | | | | 124 | 129 | |
| 375 | | | | | | | 125 | | |
| 400 | | | | | | | 126 | | |
| 425 | | | | | | | 127 | | |
| 450 | | | | | | | 129 | | |

Результати експериментального визначення зміни температури оброблялися за допомогою методів математичної статистики та кореляційного аналізу, внаслідок чого було визначено фактичну кінетику температури у поверхневому шарі дослідних зразків, графічно представлено на рис. 3.



**Рис. 3. Фактична кінетика температури дослідних зразків
(а – товщина 0,003 м; б – товщина 0,005 м; в – товщина 0,007 м)**

Результати визначення маси висушених зразків, кількість видаленої води, витрати енергії на процес кондуктивного сушіння представлено в табл. 4.

Органолептична оцінка якості сушеного м'яса проводилася відразу після його остигання. Для зразків товщиною $\delta = 0,003$ м під час стиснення з навантаженням масою $G = 10$ кг оцінка склала 4,0 бали, за $G = 20$ кг – 4,2 бали, а за $G = 30$ кг – 4,4 бали. Зразки товщиною $\delta = 0,005$ м отримали 3,6 бали під час стиснення з навантаженням масою $G = 10$ кг, 3,8 бали за $G = 20$ кг та 4,0 бали за $G = 30$ кг. Зразки товщиною $\delta = 0,007$ м показали нижчі результати: 3,0 бали під час стиснення з навантаженням масою $G = 10$ кг, 3,3 бали за $G = 20$ кг і 3,5 бали за $G = 30$ кг. Загалом зі збільшенням товщини зразка оцінка якості знижується.

Для аналізу отриманих результатів експериментального дослідження впливу стиснення, що викликає надлишковий тиск пари у поверхневому шарі м'яса, на процес кондуктивного сушіння дослідних зразків розглянемо окремо кінетику процесу.

Спочатку проаналізуємо фактичну кінетику вологовмісту. Як видно з рис. 2, збільшення маси навантаження G , що викликає стиснення дослідного зразка, приводить до інтенсивнішого видалення вологи, що узгоджується з основними теоретичними аспектами процесу сушіння [2; 6; 12; 14]. Найбільш інтенсивне видалення вологи спостерігається під час стиснення дослідного зразка навантаженням масою $G = 30$ кг. Тривалість досягнення кінцевого вологовмісту W_k під навантаженням $G = 30$ кг найменша порівняно з іншими. Зокрема, вже після 75...150 с вологовміст W опускається нижче 10%, що, ймовірно, пояснюється щільним контактом між нагрівальними поверхнями і сировиною, а також інтенсивною теплопередачею та виведенням утвореної пари за межі дослідного зразка. Під час стиснення навантаженням масою $G = 20$ кг видалення вологи є менш інтенсивним для усіх дослідних зразків. Це свідчить про те, що видалення вологи відбувається менш інтенсивно, а вологовміст W опускається нижче 10% після 150...225 с. Під час стиснення з навантаженням масою $G = 20$ кг процес зневоднення є найповільнішим. Дослідний зразок за таких умов досягає вологовмісту W нижче 10% після 175...300 с, що свідчить про суттєво повільніший процес видалення вологи.

Кожна з кривих, незалежно від стиснення, викликаного додатковим навантаженням, та надлишкового тиску пари у поверхневому шарі сировини, показує типовий для процесу сушіння вигляд: різке падіння вологовмісту на початку, яке сповільнюється у подальшому процесі. Це пояснюється короткотривалим періодом нагрівання м'ясної сировини та двома подальшими періодами сушіння [2; 7]. Більш детально цьому питанню присвячена робота [15], в якій розглянуто особливості м'ясної сировини, специфічний механізм видалення вологи за кондуктивного сушіння, причини та наслідки зниження інтенсивності видалення вологи у другому періоді та можливі шляхи інтенсифікації цього процесу. Авторами [15–16], які досліджували процес кондуктивного сушіння м'яса без додаткового навантаження, здійснено апроксимацію кінетики вологовмісту м'яса товщиною 0,003, 0,005 та 0,007 м під час сушіння з достовірністю 95,5% у вигляді модифікованої експоненти:

$$W = W_{\text{поч}} \cdot (0,989 + \sigma_m)^\tau,$$

де $W_{\text{поч}}$ – початковий вологовміст, кг/кг; σ_m – початкова товщина дослідного зразка, м; τ – тривалість процесу сушіння, с; 0,989 – кінетичний коефіцієнт.

Очевидно, що кінетика вологовмісту під час сушіння в умовах стиснення дослідного зразку, викликаного додатковим навантаженням, має аналогічний вигляд, а вплив самого навантаження враховує величину кінетичного коефіцієнта.

Апроксимація трендів кінетики вологовмісту м'яса товщиною 0,003, 0,005 та 0,007 м під час сушіння під навантаженням 10, 20 і 30 кг за даними табл. 2, дає можливість отримати аналітичну модель процесу кондуктивного

Таблиця 4. Показники процесу кондуктивного сушіння дослідних зразків

| Найменування показника | Зусилля стиснення зразка товщиною 0,003 м, кг | | | Зусилля стиснення зразка товщиною 0,005 м, кг | | | Зусилля 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 |
| Початкова маса зразка, кг | 0,018 | | | 0,020 | | | 0,022 | | |
| Маса висушеного зразка, кг | 0,0058 | 0,0039 | 0,0029 | 0,0064 | 0,0047 | 0,0035 | 0,0067 | 0,0049 | 0,0038 |
| Кількість видаленої вологи, кг | 0,0122 | 0,0141 | 0,0151 | 0,0136 | 0,0153 | 0,0165 | 0,0153 | 0,0171 | 0,0182 |
| 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 |

сушіння з достовірністю 95,5% у вигляді модифікованої експоненти, яка враховує вплив навантаження в діапазоні 0...30 кг (табл. 5):

$$W = W_{\text{поч}} \cdot ((0,989 - 0,0005 \cdot G) + \sigma_m)^t, \%$$

де G – маса додаткового навантаження під час сушіння, кг; 0,0005 – коефіцієнт, що враховує деформацію м'яса під час сушіння під навантаженням.

Таблиця 5. Визначення функції $w(\tau)$ – тренду процесу зміни вологовмісту під час кондуктивного сушіння під навантаженням

| $\tau, \text{с}$ | $\sigma_m = 0,003 \text{ м}$ | | | $\sigma_m = 0,005 \text{ м}$ | | | $\sigma_m = 0,007 \text{ м}$ | | |
|------------------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг |
| 0 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 | 72,5 |
| 25 | 52,3 | 46,0 | 40,5 | 55,0 | 48,4 | 42,6 | 57,8 | 51,0 | 44,9 |
| 50 | 37,7 | 29,2 | 22,6 | 41,7 | 32,4 | 25,1 | 46,1 | 35,8 | 27,8 |
| 75 | 27,2 | 18,6 | 12,7 | 31,6 | 21,6 | 14,8 | 36,8 | 25,2 | 17,2 |
| 100 | 19,6 | 11,8 | 7,1 | 24,0 | 14,4 | 8,7 | 29,4 | 17,7 | 10,6 |
| 125 | 14,1 | 7,5 | 4,0 | 18,2 | 9,7 | 5,1 | 23,4 | 12,4 | 6,6 |
| 150 | 10,2 | 4,8 | 2,2 | 13,8 | 6,5 | 3,0 | 18,7 | 8,7 | 4,1 |
| 175 | 7,3 | 3,0 | 1,2 | 10,5 | 4,3 | 1,8 | 14,9 | 6,1 | 2,5 |
| 200 | 5,3 | 1,9 | | 7,9 | 2,9 | 1,0 | 11,9 | 4,3 | 1,6 |
| 225 | 3,8 | | | 6,0 | 1,9 | | 9,5 | 3,0 | 1,0 |
| 250 | | | | 4,6 | 1,3 | | 7,6 | 2,1 | 0,6 |
| 275 | | | | 3,5 | | | 6,0 | 1,5 | 0,4 |
| 300 | | | | 2,6 | | | 4,8 | 1,1 | |
| 325 | | | | | | | 3,8 | 0,7 | |
| 350 | | | | | | | 3,1 | 0,5 | |
| 375 | | | | | | | 2,4 | | |
| 400 | | | | | | | 1,9 | | |
| 425 | | | | | | | 1,6 | | |
| 450 | | | | | | | 1,2 | | |

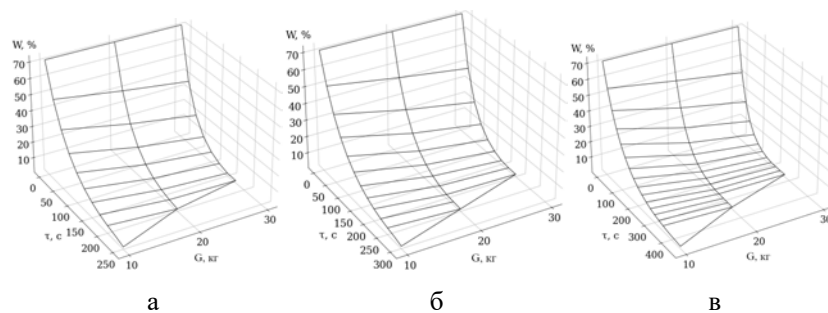


Рис. 4. Кінетика вологовмісту дослідних зразків за запропонованою моделлю (а – товщина 0,003 м; б – товщина 0,005 м; в – товщина 0,007 м)

Проаналізуємо фактичну кінетику температури в поверхневих шарах м'яса під час сушіння в умовах стиснення. Як видно з рис. 3, криві мають нелінійний характер. Поверхневі шари дослідних зразків миттєво набирають температуру $t = 100^\circ\text{C}$. В роботі [4] розраховано і експериментально підтверджено тривалість прогрівання поверхневих шарів від початкової температури (5°C) м'яса до $t = 100^\circ\text{C}$ під час кондуктивного смаження м'яса в умовах стиснення, яка складає, залежно від умов, 0,12...0,13 с. Після досягнення $t = 100^\circ\text{C}$ в поверхневих шарах інтенсивність підвищення температури сповільнюється для усіх зразків, що призводить до згладжування кривих. Нелінійний характер кривих, ймовірно, зумовлений зміною ефективності теплопередачі залежно від температури зразка та вмісту вологи, який в процесі сушіння зменшується.

Зі збільшенням товщини дослідного зразка спостерігається зростання тривалості досягнення заданої температури. Так, у дослідного зразка товщиною $\delta = 0,003 \text{ м}$ максимальна температура досягається в межах 175–225 с. Для дослідного зразка товщиною $\delta = 0,005 \text{ м}$ час досягнення тієї ж температури збільшується до 200–300 с. Для дослідного зразка товщиною $\delta = 0,007 \text{ м}$ максимальні температури досягаються через 275–450 с. Це підтверджує залежність між товщиною зразка δ і тривалістю процесу кондуктивного сушіння τ .

З фактичної кінетики температури поверхневих шарів м'яса видно, що збільшення маси навантаження G приводить до скорочення часу для досягнення максимальної температури. Так, для дослідного зразка товщиною $\delta = 0,003 \text{ м}$ за $G = 30 \text{ кг}$ максимальна температура досягається через 175 с, тобто за найкоротший час, тоді як за

$G = 10$ кг максимальна температура досягається через 225 с, тобто значно довше. Аналогічна тенденція спостерігається в решті дослідних зразків.

Автори [15–16] досліджували процес кондуктивного сушіння м'яса без додаткового навантаження. В зазначеній роботі здійснено апроксимацію фактичної кінетики температури поверхневих шарів м'яса товщиною 0,003, 0,005 та 0,007 м під час сушіння з достовірністю 95,5% у вигляді модифікованої експоненти:

$$t = t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - \Delta \bar{t}_{\text{ср}}) \cdot 0,98^{\tau}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $t_{\text{п}}$ – температура поверхонь нагріву, $^\circ\text{C}$; $\Delta \bar{t}_{\text{ср}}$ – середньотемпературний напір між поверхнею нагріву і поверхнею дослідного зразку, $^\circ\text{C}$; τ – тривалість процесу сушіння, с; 0,98 – кінетичний коефіцієнт.

Очевидно, що кінетика температури поверхневих шарів під час сушіння в умовах стиснення дослідного зразку, викликаного додатковим навантаженням, має аналогічний вигляд, а вплив самого навантаження враховує величину кінетичного коефіцієнта.

Апроксимація трендів кінетики температури поверхневих шарів м'яса товщиною 0,003, 0,005 та 0,007 м під час сушіння під навантаженням 10, 20 і 30 кг за даними табл. 2, 3 і 4 дає можливість отримати аналітичну модель тривалості процесу кондуктивного сушіння з достовірністю 95,5% у вигляді модифікованої експоненти, яка враховує вплив навантаження в діапазоні 0...30 кг і товщини дослідного зразку (табл. 6):

$$t = t_{\text{п}} - \left((3 \cdot \Delta \bar{t}_{\text{ср}} + 0,1 \cdot G) \cdot (0,987 + \sigma_{\text{м}})^{\tau} \right), \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $\Delta \bar{t}_{\text{ср}}$ – початковий середньотемпературний напір між поверхнею нагріву і поверхнею дослідного зразку під час сушіння, $^\circ\text{C}$; $\Delta \bar{t}_{\text{ср}} = 10^\circ\text{C}$.

В початковий момент (0 с) $\Delta \bar{t}_{\text{ср}} = 122^\circ\text{C}$, а кінетика набуває вигляду:

$$t = t_{\text{п}} - (\Delta \bar{t}_{\text{ср}} \cdot (0,987 + \sigma_{\text{м}})^{\tau}), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

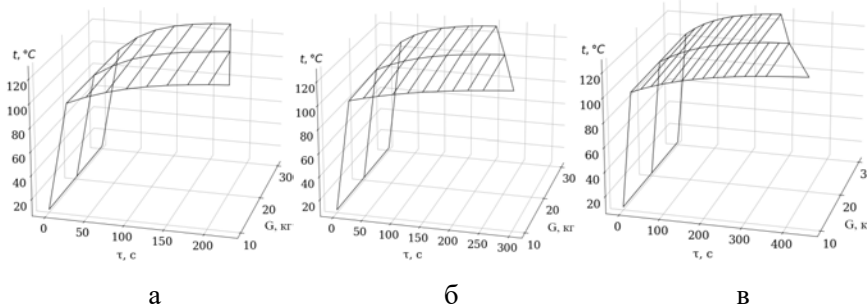


Рис. 5. Кінетика температури у поверхневому шарі дослідних зразків за запропонованою моделлю (а – товщина 0,003 м; б – товщина 0,005 м; в – товщина 0,007 м)

Аналіз кінетики вологовмісту та кінетики температури показує, що стиснення із зусиллям $G = 30$ кг максимально скорочує тривалість кондуктивного сушіння. Графічне порівняння зміни вологовмісту дослідних зразків товщиною $\delta = 0,003$ м, $\delta = 0,005$ м та $\delta = 0,007$ м під час стиснення з навантаженням масою $G = 30$ кг показано на рис. 6.

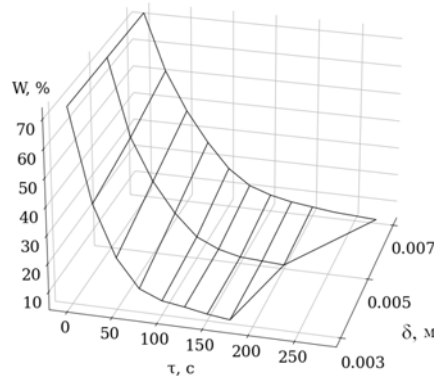


Рис. 6. Порівняння змін вологовмісту дослідних зразків м'яса різної товщини (0,003 м, 0,005 м, 0,007 м) під час стиснення із зусиллям 30 кг

Таблиця 6. Визначення функції $t(\tau)$ – тренду процесу зміни температури поверхневих шарів м'яса під час кондуктивного сушіння під навантаженням

| $\tau, \text{с}$ | $\sigma_m = 0,003 \text{ м}$ | | | $\sigma_m = 0,005 \text{ м}$ | | | $\sigma_m = 0,007 \text{ м}$ | | |
|------------------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг | 10 кг | 20 кг | 30 кг |
| 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 25 | 99,3 | 98,5 | 97,7 | 102,7 | 105,1 | 107,4 | 102,7 | 103,5 | 104,3 |
| 50 | 105,9 | 108,1 | 110,1 | 105,9 | 110,6 | 114,5 | 105,9 | 108,0 | 110,0 |
| 75 | 111,2 | 115,0 | 118,0 | 108,7 | 114,9 | 119,4 | 108,7 | 111,8 | 114,5 |
| 100 | 115,4 | 119,7 | 122,7 | 111,2 | 118,3 | 122,7 | 111,2 | 114,9 | 117,9 |
| 125 | 118,7 | 122,9 | 125,6 | 113,4 | 120,9 | 125,0 | 113,4 | 117,5 | 120,6 |
| 150 | 121,2 | 125,2 | 127,4 | 115,4 | 122,9 | 126,6 | 115,4 | 119,7 | 122,7 |
| 175 | 123,1 | 126,7 | 128,4 | 117,1 | 124,5 | 127,7 | 117,1 | 121,4 | 124,3 |
| 200 | 124,7 | 127,7 | 129,0 | 118,6 | 125,7 | 128,4 | 118,6 | 122,9 | 125,6 |
| 225 | 125,8 | 128,4 | | 120,0 | 126,7 | | 120,0 | 124,1 | 126,6 |
| 250 | | | | 121,1 | 127,4 | | 121,1 | 125,1 | 127,3 |
| 275 | | | | 122,2 | | | 122,2 | 126,0 | 127,9 |
| 300 | | | | 123,1 | | | 123,1 | 126,7 | |
| 325 | | | | | | | 123,9 | 127,2 | |
| 350 | | | | | | | 124,6 | 127,7 | |
| 375 | | | | | | | 125,3 | | |
| 400 | | | | | | | 125,8 | | |
| 425 | | | | | | | 126,3 | | |
| 450 | | | | | | | 126,8 | | |

Аналіз витрати енергії також показує зменшення її споживання зі збільшенням маси навантаження G . З табл. 4 видно, що для зразка товщиною $\delta = 0,003 \text{ м}$ питома витрата енергії складає $0,46 \text{ кВт*год}$ за $G = 30 \text{ кг}$; $0,48 \text{ кВт*год}$ за $G = 20 \text{ кг}$; $0,57 \text{ кВт*год}$ за $G = 10 \text{ кг}$. Для зразка товщиною $\delta = 0,005 \text{ м}$ питома витрата енергії складає $0,49 \text{ кВт*год}$ за $G = 30 \text{ кг}$; $0,52 \text{ кВт*год}$ за $G = 20 \text{ кг}$; $0,58 \text{ кВт*год}$ за $G = 10 \text{ кг}$. Для зразка товщиною $0,007 \text{ м}$ питома витрата енергії складає $0,52 \text{ кВт*год}$ за $G = 30 \text{ кг}$; $0,54 \text{ кВт*год}$ за $G = 20 \text{ кг}$; $0,67 \text{ кВт*год}$ за $G = 10 \text{ кг}$.

Результати органолептичної оцінки показали найвищі бали у дослідних зразків товщиною $\delta = 0,003 \text{ м}$, збільшення маси навантаження G покращує органолептичні властивості готового виробу. У зразка товщиною $\delta = 0,005 \text{ м}$ бали нижчі, при цьому збільшення зусилля стиснення також позитивно впливає на органолептичні властивості сушеного м'яса. У зразків товщиною $\delta = 0,007 \text{ м}$ якісні показники покращуються зі збільшенням маси навантаження G , проте найнижчі бали серед усіх зразків. Таким чином, найкращі результати отримані для зразків товщиною $\delta = 0,003 \text{ м}$ під час стиснення з навантаженням масою $G = 30 \text{ кг}$.

Порівняння результатів поточних експериментальних досліджень з результатами попередніх досліджень [16] дає можливість констатувати, що раціональна товщина м'яса становить $\delta = 0,003 \text{ м}$. Стиснення м'яса нагрівальними поверхнями з навантаженням масою $G = 10 \text{ кг}$, $G = 20 \text{ кг}$ та $G = 30 \text{ кг}$ скорочує тривалість процесу та зменшує витрату енергії. Максимально інтенсифікує процес кондуктивного сушіння м'яса стиснення з навантаженням масою $G = 30 \text{ кг}$. Отримані результати експериментально підтверджують гіпотезу, висунуту у публікації [15].

Висновки. За результатами експериментів встановлено фактичну кінетику вологовмісту і температури у поверхневому шарі в умовах стиснення. Дослідження показали, що стиснення істотно впливає на тривалість процесу сушіння та витрату енергії незалежно від товщини виробу. Встановлено, що питома витрата енергії найменша у зразків товщиною $0,003 \text{ м}$ і склала $0,46 \text{ кВт*год/кг}$ випареної вологи, що обґрунтовує раціональну товщину під час кондуктивного сушіння в умовах стиснення $0,003 \text{ м}$. Апроксимація фактичної кінетики вологовмісту і температури підтверджує загальний вигляд їхніх аналітичних моделей у вигляді модифікованих експонент, що враховують товщину дослідного зразка і масу навантаження. Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук можливостей додаткового скорочення тривалості процесу і зменшення витрат енергії.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Погожих М.І., Потапов В.О., Пак А.О., Жеребкін М.В. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини: навчальний посібник. Харків: ХДУХТ, 2016. 234 с.
3. Скрипник В.О., Пономаренко Б.Г. Можливість використання наявних способів для сушіння жареного м'яса. *Вісник ПДАА*. 2022. № 2. С. 287–295.
4. Скрипник В.О., Молчанова Н.Ю., Фарісеєв А.Г., Тарасенко Д.С. Підвищення енергетичної і ресурсної ефективності процесів і апаратів кондуктивного жарення м'яса: монографія. Полтава: ПДАУ, 2024. 274 с.
5. 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.

6. 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.
7. Aykan N.F. Red meat and colorectal cancer. *Oncology reviews*. 2015. Vol. 9. No. 1.
8. Cross A.J., Sinha R. Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2004. Vol. 44. No. 1. P. 44–55.
9. 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.
10. Hayashi H. Drying technologies of foods -their history and future. *Drying Technology*. 1989. Vol. 7. No. 2. P. 315–369.
11. 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.
12. Kurek M., Hanula M., Wierzbick, A., Póttorak A. Formation of carcinogens in processed meat and its measurement with the usage of artificial digestion – a review. *Molecules*. 2022. Vol. 27. No. 14. P. 46–65.
13. 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. 20–26.
14. Molognoni L., Dagher 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.
15. 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.
16. Skrypnyk V.O., Semenov A.O., Ponomarenko B.H., Farisieiev A.H. 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.

Skrypnyk V. O.

*Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Poltava State Agrarian University
Poltava, Ukraine*

E-mail: viacheslav.skrypnyk@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8883-7398

Ponomarenko B. G.

*Postgraduate Student,
Assistant at the Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Poltava State Agrarian University
Poltava, Ukraine*

E-mail: bohdan.ponomarenko@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4047-1881

RESULTS OF DETERMINING THE KINETICS OF MOISTURE CONTENT AND TEMPERATURE KINETICS IN MEAT DURING CONDUCTIVE DRYING WITH COMPRESSION

Abstract

The key challenges of modern food processing, particularly in the drying of food raw materials, include preserving the nutritional value of the final product while reducing energy consumption. Conductive drying addresses these issues, but it remains insufficiently researched, leading to a significant shortage of scientific data. The demand for long-shelf-life food products, including dried meat, has notably increased in Ukraine due to power supply disruptions caused by the war with Russia. This heightens the relevance of research in this field. Previous studies have primarily focused on determining and analyzing the kinetics of moisture content and temperature during the conductive drying of meat, without considering the compression of the meat itself. How compression affects the moisture removal process from the meat's structure remains unexplored. This study presents the results of an experimental investigation of the conductive drying of raw meat with thicknesses of 0.003 m, 0.005 m, and 0.007 m under bilateral heat supply conditions, with surface temperatures reaching up to 130°C and varying load weights that created excess steam pressure in the surface layer of the raw material. The authors examined and identified the moisture content and temperature kinetics under compression conditions with loading, determined the optimal thickness of the raw material, and assessed the quality of the final product using organoleptic methods on a 5-point scale. The results were compared with data from previous research, which studied this process without loading on the heating surface, published earlier. The findings revealed that drying under compression with loading significantly reduces the process duration and energy consumption while maintaining high product quality. The approximation of the experimental moisture content and temperature kinetics enabled the development of analytical models of the process in the form of modified exponents, taking into account the sample thickness and the applied load mass.

Key words: conductive, temperature kinetics, moisture content kinetics, drying, meat, compression, excess pressure, load.

References

1. International Organization for Standardization. (2023). Meat and meat products – Determination of moisture content (Reference method). <https://www.iso.org/standard/82664.html> [in English].

2. Pohozykh, M.I., Potapov, V.O., Pak, A.O., & Zherebkin, M.V. (2016). Enerhoefektyvni tekhnolohii ta tekhnika sushinnia kharchovoi syrovyny. [Energy-efficient technologies and equipment for drying food raw materials]. Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].
3. Skrypnyk, V.O., & Ponomarenko, B.H. (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].
4. Skrypnyk, V.O., Molchanova, N.Yu., Farisieiev, A.H., & Tarasenko, D.S. (2024). Pidvyshchennia enerhetychnoi i resursnoi efektyvnosti protsesiv i aparativ konduktivnoho zharennia miasa. [Improving the energy and resource efficiency of meat conductive roasting processes and apparatus]. Poltava, PDAU [in Ukrainian].
5. 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 [in English].
6. 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 [in English].
7. Aykan, N.F. (2015). Red meat and colorectal cancer. *Oncology reviews*, 9 (1), 288. DOI: 10.4081/oncol.2015.288 [in English].
8. 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 [in English].
9. 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 [in English].
10. Hayashi, H. (1989). Drying Technologies of Foods -Their History and Future. *Drying Technology*, 7 (2), 315–369. DOI: 10.1080/07373938908916590 [in English].
11. 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 [in English].
12. Kurek, M., Hanula, M., Wierzbicka, A., & Poltorak, 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 [in English].
13. 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 [in English].
14. 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 [in English].
15. 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].
16. 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 [in English].