

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-3>

УДК 664.93:637.523

БАТРАЧЕНКО ОЛЕКСАНДР

Черкаський державний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8920-0743>

e-mail: o.batrachenko@chdtu.edu.ua

ДОРОШКО ДЕНИС

Черкаський державний технологічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-1477-3660>

e-mail: d.r.doroshko.asp24@chdtu.edu.ua

МОРФОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЇ ЖИРОВОЇ ФАЗИ СУХИХ КОВБАС

Метою даної роботи є кількісна морфометрична оцінка просторової організації жирової фази в сухих ковбасах на основі цифрового аналізу їх поперечних зрізів, а також встановлення зв'язку між топологією жирових включень і потенційними особливостями масоперенесення вологи під час сушіння. Об'єктами дослідження були сухі ковбаси, представлені на споживчому ринку України. Кожен батон нарізали на поперечні зрізи з фіксованим інтервалом, після чого здійснювали фотофіксацію в стандартизованих умовах. Цифрову обробку зображень виконували з використанням програмного забезпечення ImageJ із застосуванням алгоритмів сегментації жирової фази. На основі бінаризованих зображень визначали площинну частку жиру, середній еквівалентний діаметр включень, коефіцієнт їх форми, радіальний розподіл жирової фази та варіабельність параметрів уздовж батона. Вперше запропоновано підхід до кількісного морфометричного опису топології жирової фази сухих ковбас як самостійного структурного параметра, що не зводиться до середнього вмісту жиру. Обґрунтовано доцільність використання морфометричних показників (площинної частки, геометрії включень, радіального профілю та варіабельності) для інженерної інтерпретації внутрішньої структури продукту. Показано, що просторове розташування жирової фази визначає конфігурацію дифузійних шляхів і може розглядатися як фактор, що впливає на тортуозність масоперенесення. Таким чином, структура ковбаси інтерпретується як елемент її "внутрішньої транспортної архітектури". Встановлено, що досліджені зразки сухих ковбас суттєво відрізняються не лише за загальним вмістом жиру, а й за його просторовою організацією, геометрією включень та ступенем неоднорідності. Показано, що навіть при близьких значеннях площинної частки жиру можливі принципово різні топологічні структури, які потенційно формують різні умови масоперенесення. Перспективним напрямом є використання морфометричних характеристик як вхідних параметрів для моделювання процесів сушіння та розроблення технологій із контрольованою внутрішньою транспортною архітектурою.

Ключові слова: сухі ковбаси, жирова фаза, морфометрія, топологія структури, цифровий аналіз

BATRACHENKO OLEXANDR, DOROSHO DENYS

Cherkassy State Technological University

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE FAT PHASE TOPOLOGY IN DRY SAUSAGES

The aim of this study is to provide a quantitative morphometric assessment of the spatial organization of the fat phase in dry sausages based on digital analysis of their cross-sections, as well as to establish the relationship between the topology of fat inclusions and the potential features of moisture mass transfer during drying. The objects of the study were dry sausages available on the consumer market of Ukraine. Each sausage was sliced into cross-sections at fixed intervals, followed by image acquisition under standardized conditions. Digital image processing was performed using ImageJ software with fat phase segmentation algorithms. Based on binarized images, the area fraction of fat, the mean equivalent diameter of inclusions, shape factors, radial distribution of the fat phase, and variability of parameters along the sausage length were determined. For the first time, an approach to the quantitative morphometric description of fat phase topology in dry sausages is proposed as an independent structural parameter that is not reducible to the average fat content. The relevance of using morphometric indicators (area fraction, inclusion geometry, radial profile, and variability) for the engineering interpretation of the internal structure of the product is substantiated. It is demonstrated that the spatial arrangement of the fat phase determines the configuration of diffusion pathways and can be considered as a factor influencing the tortuosity of mass transfer. Thus, the sausage structure is interpreted as an element of "internal transport architecture". It was established that the studied dry sausage samples differ significantly not only in total fat content but also in the spatial organization of the fat phase, inclusion geometry, and degree of heterogeneity. It is shown that even at similar values of fat area fraction, fundamentally different topological structures may occur, potentially forming different mass transfer conditions. A promising direction is the use of morphometric characteristics as input parameters for drying process modeling and for the development of technologies with controlled internal transport architecture.

Keywords: dry sausages, fat phase, morphometry, structural topology, digital image analysis.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Батраченко Олександр, Дорошко Денис

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сухі ферментовані ковбаси є складними багатокомпонентними м'ясними системами, формування структури яких відбувається внаслідок подрібнення, змішування, ферментації та тривалого сушіння. Саме процес сушіння є визначальним етапом виробництва, оскільки забезпечує зниження масової частки вологи, досягнення необхідного рівня активності води та стабілізацію мікробіологічного стану продукту [1].

У сучасній технологічній практиці основна увага приділяється регулюванню зовнішніх параметрів сушіння — температури, відносної вологості повітря, швидкості повітряного потоку та тривалості процесу.

Водночас внутрішня структура ковбасного батона розглядається переважно як наслідок рецептури та механічної обробки фаршу, а не як об'єкт цілеспрямованого структурного аналізу [2].

Сухі ковбаси являють собою гетерогенну білково-жирову систему, в якій м'язова тканина формує капілярно-пористу матрицю, а жирові включення (переважно шпик) розподіляються в її об'ємі у вигляді частинок різної форми та розміру [3]. Традиційно жирова фаза оцінюється за масовою часткою та середнім розміром частинок, а її вплив аналізується здебільшого з позицій текстурних і сенсорних характеристик продукту.

Разом із тим просторове розташування жирової фази в об'ємі батона, її радіальна концентрація, ступінь агрегації та варіабельність уздовж довжини виробу практично не досліджувалися як кількісні морфометричні показники. У класичних роботах із технології м'ясних продуктів структура сухих ковбас описується переважно якісно — як дисперсна система з жировими включеннями в білковій матриці, без детальної оцінки їх топологічних характеристик [4].

Таким чином, у науковій літературі відсутні систематичні дослідження, спрямовані на кількісний морфометричний аналіз просторової організації жирової фази в сухих ковбасах як самостійного структурного параметра. Це зумовлює необхідність формування підходу до об'єктивного вимірювання площинної частки жиру, розміру та форми включень, радіального профілю розподілу й внутрішньобатонної варіабельності показників, що може стати підґрунтям для подальшої інженерної інтерпретації внутрішньої структури продукту.

У зв'язку з цим актуальним є проведення морфометричного аналізу просторової організації жирової фази в сухих ковбасах з використанням методів цифрової обробки зображень, що дозволить кількісно охарактеризувати її геометричні параметри та варіабельність.

Аналіз досліджень та публікацій

Сушіння та дозрівання сухих/ферментованих ковбас у сучасній науці розглядається як комплекс взаємопов'язаних процесів масо- і теплоперенесення, фазових та структурних перетворень білково-ліпідної матриці, а також мікробіологічної динаміки. Класична технологічна логіка керування сушінням базується переважно на зовнішніх параметрах (температура, вологість, швидкість повітря, час), тоді як внутрішня структура батона часто трактувалась як “даність”, що формується внаслідок змішування фаршу та набивання його в ковбасну оболонку. Водночас сучасна інженерія харчових систем прямо вказує, що мікро- і мезоструктура визначають функціональність (зокрема транспортні властивості), а отже потребують кількісного опису та керуваності [5].

Для сухих ковбас критичним є те, що зневоднення обмежується внутрішнім переносом вологи, і навіть за досягнення “середніх” нормативних показників можливі локальні зони підвищеної вологості, які формують ризики мікробіологічної нестабільності та варіабельності якості. Це добре узгоджується з експериментальними підходами просторового оцінювання активності води та демонстрацією неоднорідності продукту, що прямо підштовхує до потреби просторового (а не лише інтегрального) характеризування структури [6].

Особливості формування безперервної білкової матриці є ключовими для текстури й стабільності продукту, а його структура змінюється внаслідок операцій подрібнення, соління, ферментації та сушіння. Однак відомі роботи переважно описували якісні закономірності мікроструктури, не переходячи до інженерних метрик топології ліпідної фази у поперечному перерізі [7].

Сучасний етап розвитку тематики суттєво підсилюється завдяки інструментальним методам 3D-візуалізації та поєднанню з моделями перенесення. Показово, що для сальмі застосовували рентгенівську томографію для кількісного опису внутрішньої гетерогенності, а також для пов'язування структурних змін із технологічними стадіями [8]. Принципово важливо, що такі підходи відкривають шлях до переведення “структури” у вимірювані показники, але комп'ютерна томографія не завжди доступна для звичайних досліджень. Тому 2D-аналіз зривів залишається найбільш практичним для масових порівнянь ковбас різних виробників або партій.

Важливий підхід спостерігається в роботах, де моделі сушіння для ферментованих ковбас будували на реальному розподілі м'ясної та жирової фаз, отриманому методами аналізу зображень. Це прямо підтверджує, що просторова організація жирової фази (а не лише її масова частка) є вагомим фактором для прогнозу кінетики процесу сушіння [9].

Окрема група робіт з фізики процесів в харчових технологіях пропонує інженерні метрики для кількісного опису гетерогенних харчових систем через геометричні чи статистичні функції структури і демонструє їх прикладну цінність для порівняння зразків [10].

Паралельно, технологічні роботи чітко показують, що режим відносної вологості та її керування визначає ризики пересушування периферії та формування ущільненого шару, тобто зовнішні умови можуть запускати вторинні бар'єри перенесення [11]. А для м'ясних систем у ширшому сенсі вплив на втрати маси та динаміку процесів визнається критичним і для сиров'ялених продуктів [12].

Важливо також, що показники активності води, мікробіологічні характеристики та ароматоутворення залежать від стану продукту на певних стадіях (зокрема від вологості на момент пакування), що підтверджує технологічну сенс врахування внутрішньої неоднорідності й різної швидкості зневоднення [13].

Окремий приклад сучасного інструментального аналізу — це моніторинг стадій ферментації та сушіння методами NIRS, що підкреслює тренд до кількісного опису дозрівання і потенціал кореляції з морфометрією структури [14]. Також цікавими є роботи, де демонструються кількісні підходи до аналізу дефектів та структурних змін у м'ясі з використанням томографії та NMR [15]. Однак у відомих роботах не наведено ґрунтового морфометричного аналізу просторової організації жирової фази в сухих ковбасах, що потребує свого

вирішення.

Таким чином, у сучасній літературі відсутній підхід, який би безпосередньо пов'язував морфометричні характеристики жирової фази з тортуюзністю масоперенесення як інженерною метрикою. Це обмежує можливість переходу від описового аналізу структури до кількісного прогнозування процесів сушіння.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є кількісна морфометрична оцінка просторової організації жирової фази в сухих ковбасах на основі цифрового аналізу їх поперечних зрізів.

Завдання дослідження:

- 1) розробити та апробувати методику цифрової морфометрії для виділення жирової фази на поперечних зрізах сухих ковбас і визначення її площинної частки;
- 2) кількісно охарактеризувати геометричні параметри жирових включень (еквівалентний діаметр, коефіцієнт форми, ступінь агрегації) у досліджених зразках;
- 3) проаналізувати радіальний розподіл жирової фази в поперечному перерізі ковбасного батона та оцінити приповерхневу концентрацію жиру;
- 4) визначити варіабельність морфометричних параметрів уздовж довжини ковбас та оцінити ступінь структурної неоднорідності.

Виклад основного матеріалу

Об'єктами дослідження були сухі ковбаси, представлені на споживчому ринку України. Для морфометричного аналізу було відібрано шість видів сухих ковбас різних марок і виробників, які найбільш широко представлені на споживчому ринку України (рис. 1). Їх загальні назви та кодування наведено в таблиці 1 (бренди не зазначалися).

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних зразків сухих ковбас		
Код ковбаси	Вид та підвид ковбаси	Діаметр ковбасного батону, мм
K1	Сирокопчена	50
K2	Сирокопчена салями	50
K3	Сирокопчена салями	50
K4	Сирокопчена салями	50
K5	Сирокопчена салями	90
K6	Сирокопчена салями	100

Для кожного виду ковбаси досліджували по два батони стандартного промислового діаметра. Фактичний діаметр визначали штангенциркулем у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Загальна кількість проаналізованих батонів становила 12 одиниць.

Кожен батон нарізали на поперечні зрізи перпендикулярно до поздовжньої осі виробу. Нарізання здійснювали з фіксованим інтервалом уздовж довжини батона (10–12 мм), що забезпечувало репрезентативне охоплення центральної та периферійних зон виробу. Для морфометричного аналізу відбирали по 5–7 зрізів з кожного батона, рівномірно розташованих по його довжині. Загальна кількість проаналізованих зрізів перевищувала 50 одиниць.

Фотофіксація та підготовка зображень здійснювалась наступним чином. Кожен зріз розміщували на контрастному нейтральному фоні та фотографували за стандартних умов освітлення. Для мінімізації тіней і відблисків використовували розсіяне рівномірне освітлення. Фотофіксацію здійснювали цифровою камерою з фіксованою відстанню до об'єкта та сталою роздільною здатністю. Отримані зображення зберігали у форматі без втрати якості та використовували для подальшої цифрової обробки.

Методика цифрової морфометрії полягала в наступному. Цифрову обробку зображень здійснювали з використанням програмного забезпечення ImageJ та власних алгоритмів обробки зображень. На першому етапі виконували попередню обробку зображень, що включала корекцію контрастності та нормалізацію яскравості. Далі здійснювали сегментацію зображення з метою виділення жирової фази. Сегментацію виконували шляхом переведення зображення у бінарний формат, де жирова фаза ідентифікувалась як світла область, а м'язова матриця — як темна. Коректність сегментації перевіряли візуально для кожного зображення з метою виключення помилок класифікації фаз.

На основі бінаризованих зображень для кожного поперечного зрізу визначали такі наступні параметри.

Площинну частку жирової фази (φ , %) визначали як відношення сумарної площі жирових включень A_f до загальної площі поперечного перерізу A :

$$\varphi = \frac{A_f}{A} \times 100. \quad (1)$$

Середній еквівалентний діаметр жирових включень (d_{eq} , мм) розраховували для кожної частинки як діаметр кола, еквівалентного за площею:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \quad (2)$$

де A_i — площа i -го жирового включення. Середнє значення визначали як середнє арифметичне по всіх включеннях у межах зрізу.

Коефіцієнт форми жирових включень (S_f) визначали як показник їх округлості:

$$S_f = \frac{4\pi \cdot A_i}{P_i^2} \quad (3)$$

де P_i — периметр i -го включення. Значення $S_f \rightarrow 1$ відповідає формі, близькій до кола, тоді як зменшення показника свідчить про видовженість або складну форму частинок.

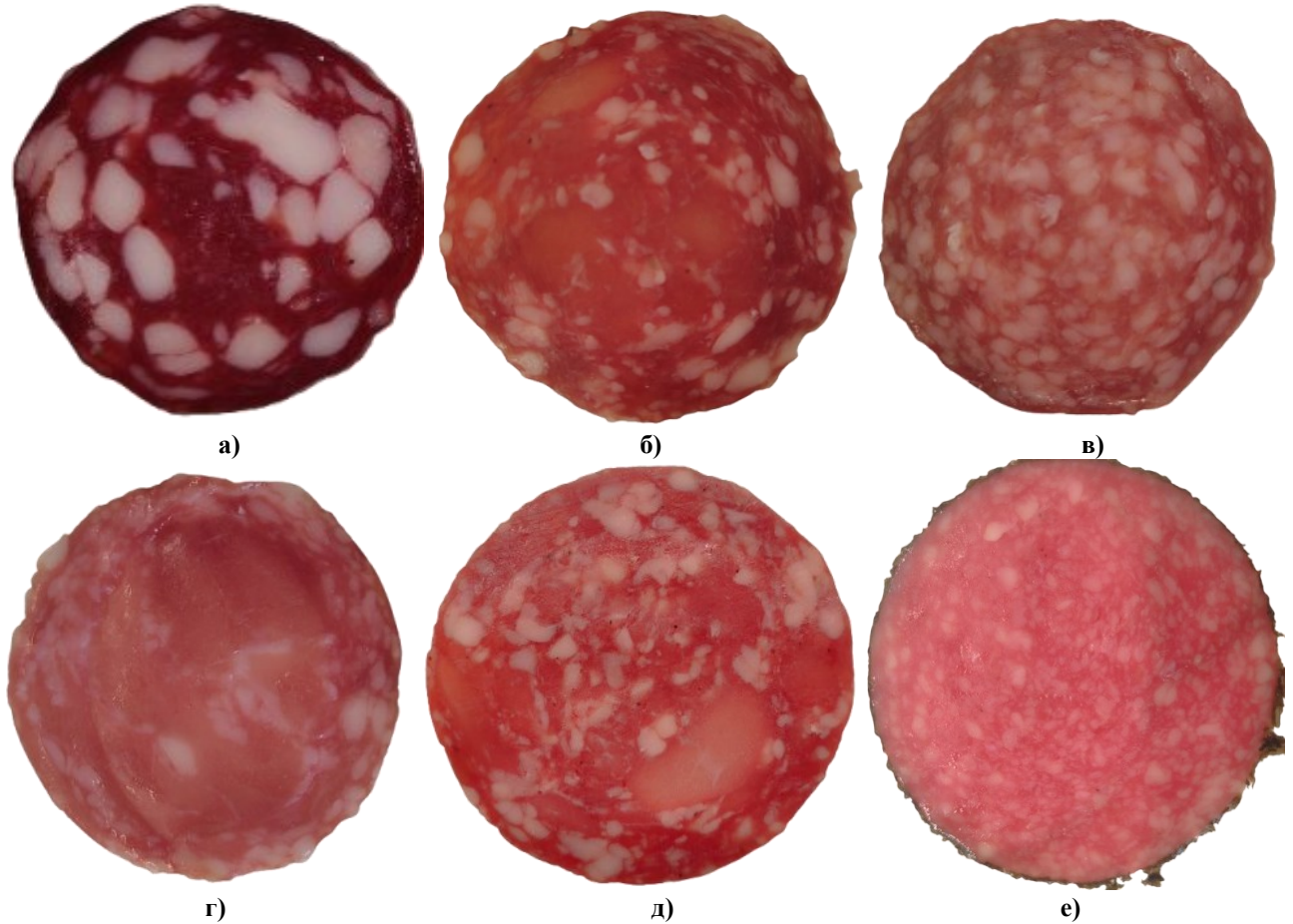


Рис. 1. Фото поперечних зрізів ковбасних батонів: а – К1; б – К2; в – К3; г – К4; д – К5; е – К6

Радіальний розподіл жирової фази визначали шляхом поділу поперечного перерізу на концентричні кільця радіусом r_i з нормуванням на загальний радіус ковбасного батона R . Для кожної зони розраховували локальну площинну частку жиру:

$$\varphi_{f(r)} = \frac{A_{f(r)}}{A_{(r)}} \quad (4)$$

де $A_{f(r)}$ — площа жиру в межах відповідного кільця, $A_{(r)}$ — площа кільця.

Приповерхневу частку жирової фази (φ_{surf} , %) визначали у зоні товщиною $\delta=0-5$ мм, яка примикає до оболонки:

$$\varphi_{surf} = \frac{A_{f,surf}}{A_{surf}} \times 100 \quad (5)$$

Варіабельність параметрів вздовж ковбасного батона оцінювали за коефіцієнтом варіації (CV , %):

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (6)$$

де σ — стандартне відхилення показника між зрізами одного батона; μ — середнє значення показника.

Отримані результати аналізували з метою виявлення відмінностей між видами ковбас та оцінки стабільності просторової організації жирової фази в межах одного ковбасного батона.

Результати морфометричного аналізу наведені в таблицях 2-4.

Отримані результати морфометричного аналізу свідчать про суттєву відмінність досліджених зразків сухих ковбас як за інтегральними показниками вмісту жирової фази, так і за її просторовою організацією, геометрією включень та ступенем внутрішньої неоднорідності.

Таблиця 2

Загальні морфометричні параметри жирової фази сухих ковбас

Код зразка	Площинна частка жирової фази φ , %	Середній еквівалентний діаметр d_{eq} , мм	Коефіцієнт форми жирових включень S_f	Приповерхнева частка жирової фази φ_{surf} , %
K1	40,2± 2,1	5,2	0,83	24,6
K2	23,3± 3,8	3,2	0,82	28,5
K3	35,2± 2,6	2,9	0,93	30,7
K4	23,7± 3,2	3,9	0,84	34,0
K5	28,7± 1,7	6,1	0,91	28,1
K6	36,1± 3,5	3,5	0,75	42,7

Таблиця 3

Радіальний розподіл жирової фази (% площі) у поперечному перерізі ковбасного батона залежно від радіусу вимірювання R

Код зразка	(0–0,25)R	(0,25–0,5)R	(0,5–0,75)R	(0,75–1,0)R
K1	12,14	43,97	54,77	31,46
K2	19,5	15,0	23,1	27,5
K3	35,5	34,2	38,8	33,1
K4	20,4	15,8	16,9	32,5
K5	26,9	27,8	28,6	29,4
K6	31,4	41,7	37,5	34,7

Передусім слід відзначити, що площинна частка жирової фази φ змінюється в досить широкому діапазоні — від 23,3% (K2) до 40,2% (K1). Водночас ці значення не можуть розглядатись як самодостатня характеристика структури, оскільки навіть зразки з близьким вмістом жиру демонструють принципово різну морфологію. Так, K3 (35,2%) і K6 (36,1%) мають співставні значення φ , однак суттєво відрізняються за коефіцієнтом форми (0,93 проти 0,75) та приповерхневою концентрацією жиру (30,7% проти 42,7%), що свідчить про різний характер формування жирової фази.

Таблиця 4

Варіабельність морфометричних параметрів всередині окремого ковбасного батона

Код зразка	Коефіцієнт варіації CV_{φ} , %	Коефіцієнт варіації $CV_{d_{eq}}$, %	Коефіцієнт варіації CV_{S_f} , %
K1	5,2	13,5	5
K2	16,3	20,0	7,5
K3	7,4	11,5	4,0
K4	13,5	17,0	6,5
K5	5,9	10,5	3,5
K6	9,7	16,0	10,0

Аналіз середнього еквівалентного діаметра жирових включень показує, що зразки K1 та K5 характеризуються найбільшими включеннями (5,2 та 6,1 мм відповідно), тоді як для K2–K4 переважає дрібнодисперсна структура (2,9–3,9 мм). Це дозволяє розглядати досліджені ковбаси як системи з різною дисперсністю жирової фази, що безпосередньо впливає на формування транспортних (дифузійних) властивостей білково-жирової матриці.

Коефіцієнт форми жирових включень S_f приймає значення в межах 0,75–0,93. Найбільш однорідна, близька до ізометричної форма характерна для K3 та K5 (0,93 та 0,91), тоді як у K6 спостерігається значне відхилення від округлості (0,75), що вказує на деформацію або злиття жирових включень. Така морфологія може бути пов'язана з особливостями технологічної обробки фаршу, його рецептури та з умовами сушіння.

Суттєві відмінності виявлено у приповерхневій концентрації жирової фази. Значення φ_{surf} коливаються від 24,6% (K1) до 42,7% (K6), що свідчить про різний характер перерозподілу жиру в радіальному напрямку. Зокрема, для K6 характерною є виражена акумуляція жиру в приповерхневій зоні, що може бути наслідком структурних перебудов під час сушіння або високої початкової неоднорідності фаршу.

Радіальний аналіз розподілу жирової фази (табл. 3) дозволяє виділити кілька типових профілів. Для K1 спостерігається мінімальна частка жиру в центральній зоні (12,14%) та різке її зростання в середніх шарах (до 54,77%), що вказує на нерівномірну агрегацію жирової фази. Зразок K5 демонструє практично рівномірний розподіл жиру по всьому радіусу (26,9–29,4%), що свідчить про більш однорідну структуру. У випадку K4 та K2 спостерігається підвищення концентрації жиру в приповерхневій зоні, що може формувати локальні бар'єри для масоперенесення.

Особливу увагу слід приділити показникам варіабельності морфометричних параметрів уздовж довжини ковбасного батона (табл. 4). Значення коефіцієнта варіації для площинної частки жиру CV_ϕ змінюються від 5,2% (K1) до 16,3% (K2), що свідчить про різний рівень структурної стабільності продуктів. Найбільш однорідними є зразки K1 та K5 ($CV_\phi < 6\%$), тоді як K2 та K4 характеризуються значною внутрішньою неоднорідністю.

Аналогічна тенденція простежується для еквівалентного діаметра жирових включень. Значення CV_{deg} досягають 20,0% (K2), що вказує на значну варіабельність розмірів включень уздовж батона, тоді як для K5 цей показник становить лише 10,5%, що підтверджує його структурну стабільність.

Коефіцієнт варіації форми включень CV_{sf} у більшості випадків є нижчим (3,5–10,0%), однак для K6 він досягає 10,0%, що узгоджується з низьким середнім значенням S_f і свідчить про нестабільність геометрії жирових включень.

Узагальнюючи отримані результати, можна констатувати, що досліджені ковбаси істотно відрізняються за типом просторової організації жирової фази. Частина зразків (K1, K5) характеризується відносно однорідною структурою як у радіальному напрямку, так і вздовж довжини ковбасного батона, тоді як інші (K2, K4, частково K6) демонструють виражену структурну неоднорідність.

Таким чином, встановлено, що морфометричні характеристики жирової фази мають багатовимірний характер і не можуть бути зведені лише до показника її середнього вмісту. Просторовий розподіл, геометрія включень та їх варіабельність є незалежними параметрами, які визначають структурний стан продукту та повинні враховуватися при аналізі та оптимізації технології сухих ковбас.

Отримані морфометричні характеристики жирової фази дозволяють перейти від описового аналізу структури до її інженерної інтерпретації з позицій масоперенесення, формування активності води та забезпечення мікробіологічної стабільності продукту.

Жирова фаза в сухих ковбасах виконує роль структурного елемента, який не бере участі у перенесенні вологи, але суттєво впливає на геометрію шляхів дифузії в межах білкової матриці. Відповідно, її просторове розташування визначає ефективну довжину дифузійного шляху та ступінь звивистості (тортуозності) транспортних каналів.

У цьому контексті встановлені відмінності між зразками набувають принципового значення. Так, для зразків K1 та K5, які характеризуються відносно рівномірним радіальним розподілом жиру та низькими значеннями коефіцієнтів варіації ($CV_\phi \approx 5\text{--}6\%$), можна припустити формування більш безперервної білкової матриці з відносно прямолінійними шляхами перенесення. Це створює передумови для більш рівномірного зневоднення по всьому об'єму батона та зменшує ризик утворення локальних зон підвищеної вологості.

Натомість для зразків K2 та K4, які демонструють високу варіабельність морфометричних параметрів (CV_ϕ до 16,3%, CV_{deg} до 20,0%) і нерівномірний радіальний розподіл жирової фази, формується більш складна топологія внутрішньої структури. У таких системах жирові включення можуть утворювати локальні скупчення або бар'єрні зони, які збільшують тортуозність дифузійних шляхів і, відповідно, уповільнюють внутрішній масоперенос. Це призводить до підвищеної ймовірності збереження вологи в окремих ділянках навіть за досягнення нормативних середніх значень.

Особливий інтерес становить зразок K6, для якого зафіксовано одночасно високу приповерхневу концентрацію жиру ($\phi_{surf} = 42,7\%$), знижену регулярність форми включень ($S_f = 0,75$) та підвищену варіабельність ($CV_{sf} = 10\%$). Така комбінація ознак свідчить про формування структурно неоднорідної приповерхневої зони, яка може виконувати роль додаткового опору для масоперенесення. У поєднанні з відносно великим діаметром ковбасного батона (100 мм) це створює умови для виникнення суттєвих градієнтів вологості між центром і периферією та потенційного формування “критичних зон” із підвищеним значенням активності води.

Радіальні профілі розподілу жиру додатково підтверджують, що просторове розташування жирової фази може суттєво відрізнятися навіть при близьких значеннях її загальної частки. Зокрема, наявність зон з пониженою часткою жиру в центрі (K1) або, навпаки, його накопичення в приповерхневій області (K4, K6) свідчить про формування різних типів внутрішньої транспортної архітектури продукту. У першому випадку центр ковбасного батона потенційно має більш відкриту структуру для перенесення, тоді як у другому — можуть виникати локальні бар'єри, що ускладнюють вихід вологи.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Встановлено, що не лише середній вміст жирової фази, але й її топологічна організація, зокрема радіальний розподіл, ступінь агрегації та варіабельність уздовж батона, визначають ефективність процесів масоперенесення в сухих ковбасах. Отримані результати підтверджують доцільність розгляду структури продукту як інженерного параметра, який може бути цілеспрямовано оптимізований або вдосконалений.

З практичної точки зору це означає, що контроль лише рецептурних показників (зокрема масової частки жиру) є недостатнім для забезпечення стабільної якості продукту. Натомість перспективним напрямом є керування просторовою організацією жирової фази на етапах подрібнення, змішування та формування фаршу з метою мінімізації тортуозності транспортних шляхів і забезпечення більш однорідного зневоднення.

У більш широкому контексті отримані результати можуть бути використані як експериментальна основа для побудови моделей сушіння, що враховують реальну геометрію розподілу фаз, а також для розроблення інженерних підходів до керування внутрішньою структурою м'ясних продуктів, зокрема шляхом формування їх контрольованої “внутрішньої транспортної архітектури”.

Література

1. Lawrie R.A., Ledward D.A. *Lawrie's Meat Science*. 8th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2006. 442 p.
2. Feiner G. *Meat Products Handbook: Practical Science and Technology*. Cambridge : Woodhead Publishing, 2006. 648 p.
3. Toldrá F. *Handbook of Fermented Meat and Poultry*. 2nd ed. Ames : Wiley-Blackwell, 2015. 576 p.
4. Honikel K.O. Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science*. 1998. Vol. 49. P. 447–457.
5. Aguilera J.M. Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 67, No. 1–2. P. 3–11. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050.
6. Beňo P., Štefániková J., Nagyová E., Vietoris V. Water activity of Czech dry-cured meat products: Influence of sampling point and sample preparation method. *Czech Journal of Food Sciences*. 2023. Vol. 41. P. 340–347. DOI: 10.17221/99/2023-CJFS.
7. Katsaras K., Budras K.-D. Microstructure of fermented sausage. *Meat Science*. 1992. Vol. 31, No. 2. P. 121–134. DOI: 10.1016/0309-1740(92)90032-Y.
8. Frisullo P., Marino R., Laverse J., Albenzio M., Del Nobile M.A. X-ray microcomputed tomography and fractal analysis of microstructure of a traditional Italian salami during ripening. *Journal of Food Engineering*. 2009. Vol. 94, No. 3–4. P. 283–289. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.03.020.
9. Fabbri A., Cevoli C., Dalla Rosa M. A 2D water transfer finite elements model of salami drying based on real fat and meat distribution acquired by image analysis. *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 152. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.005.
10. Derossi A., De Pilli T., Severini C. Statistical description of fat and meat phases of sausages by the use of lineal-path distribution function. *Food Biophysics*. 2012. Vol. 7. P. 258–263. DOI: 10.1007/s11483-012-9264-1.
11. Chmiel M., Słowiński M., Dasiewicz K., Florowski T. Effect of relative humidity on the drying parameters and quality of dry-aged beef. *Foods*. 2022. Vol. 11, No. 6. 811. DOI: 10.3390/foods11060811.
12. Arnau J., Guerrero L., Sárraga C. The effect of green ham pH and subcutaneous fat thickness on dry-cured ham quality. *LWT – Food Science and Technology*. 2012. Vol. 47, No. 2. P. 301–308. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.12.023.
13. Tabanelli G., Montanari C., Grazia L., Lanciotti R., Gardini F. Effects of aw at packaging time and atmosphere composition on aroma profile, biogenic amine content and microbiological features of dry fermented sausages. *Meat Science*. 2013. Vol. 94, No. 2. P. 177–186. DOI: 10.1016/j.meatsci.2013.01.018.
14. González-Mohino A., Antequera T., Pérez-Palacios T., Grassi S., Prieto N., Linares M.B. Monitoring the processing of dry fermented sausages with a portable NIRS device. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 9. 1294. DOI: 10.3390/foods9091294.
15. Scussat S., Rutledge D.N., Souchon I., Bastianelli D., Potin A.-S., Debrauwer L., et al. The impact of cooking on meat microstructure studied by low field NMR and neutron tomography. *Food Structure*. 2017. Vol. 14. P. 23–33. DOI: 10.1016/j.foostr.2017.06.002.