

Святненко Роман Сергійович

кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник проблемної науково-дослідної лабораторії,
Національний університет харчових технологій
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0895-6982>

Корсун Анна Ярославівна

начальник мікробіологічної лабораторії,
науково-дослідного випробувального центру харчової продукції
ДП «Полтавастандартметрологія»
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8662-1734>

Маринін Андрій Іванович

кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник,
завідувач проблемної науково-дослідної лабораторії,
Національний університет харчових технологій
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6692-7472>

Пасічний Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів,
Національний університет харчових технологій
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0138-5590>

Шевченко Олександр Юхимович

доктор технічних наук, професор, ректор,
Національний університет харчових технологій
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8818-2667>

ВИКОРИСТАННЯ ІНКАПСУЛЯЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У М'ЯСНИХ ПАШТЕТАХ З КУРЯЧОЇ ПЕЧІНКИ

У статті здійснено аналітичний огляд сучасних наукових джерел щодо застосування інкапсуляційних технологій у виробництві м'ясних паштетів з курячої печінки як перспективного напрямку створення функціональних харчових продуктів. Особливу увагу приділено обґрунтуванню вибору типів інкапсуляційних матриць, зокрема полімерних, білкових і полісахаридних, а також їх комбінованих систем, які забезпечують ефективний захист біоактивних компонентів у складній білково-жировій м'ясній системі. Розглянуто основні методи формування капсул, включаючи спрей-сушіння, коацервацію та наноемульгування, з урахуванням їх технологічних особливостей, переваг і обмежень при використанні у фаршевих продуктах. Описано функціональні можливості інкапсуляції антиоксидантів, вітамінів, пробіотиків, ароматичних і антимікробних речовин, що сприяє підвищенню стабільності, біодоступності та збереженню якості продукції під час зберігання. Водночас визначено специфічні труднощі, пов'язані з хімічними та структурними особливостями паштетної матриці, зокрема наявністю гемового заліза, емульгованих жирів, активних окисно-відновних процесів і варіаціями рН, які можуть впливати на стабільність інкапсульованих речовин та ефективність їх вивільнення. Проаналізовано близько 25 наукових джерел, включаючи сучасні зарубіжні та вітчизняні дослідження, що дозволило узагальнити наявні підходи та визначити ступінь їх адаптації до м'ясних систем. Встановлено, що, незважаючи на інтенсивний розвиток інкапсуляційних технологій у харчовій промисловості, їх практичне застосування у виробництві паштетів залишається обмеженим і потребує подальших експериментальних і технологічних досліджень. У роботі сформульовано ключові підходи до використання інкапсуляції у м'ясних продуктах та обґрунтовано напрями майбутніх досліджень, спрямованих на розроблення інноваційних функціональних виробів з підвищеною стабільністю, безпечністю та покращеними органолептичними характеристиками.

Ключові слова: інкапсуляція, паштет з курячої печінки, біоактивні речовини, полімерні носії, функціональні інгредієнти, стабільність, м'ясна матриця, спрей-сушіння, антиоксиданти, пробіотики.



Постановка проблеми та її актуальність.

Паштети з курячої печінки належать до традиційної групи м'ясних делікатесів, що вирізняються високою харчовою цінністю, пастоподібною структурою та готовністю до споживання. Утім, цей тип продукції характеризується обмеженою хімічною й мікробіологічною стабільністю, зокрема через високу вологість, наявність гемового заліза, емульгованих жирів і термолабільних компонентів [1, 20]. Основними проблемами залишаються інтенсивне ліпідне окиснення, втрата біоактивних сполук, деградація ароматичних речовин та зниження сенсорної якості під час зберігання.

Одним із сучасних підходів до подовження терміну зберігання та підвищення функціонально-технологічних показників м'ясних виробів є застосування технологій інкапсуляції харчових композицій в складі продуктів. Інкапсуляція забезпечує захист чутливих інгредієнтів (антиоксидантів, вітамінів, пробіотиків тощо), контрольоване вивільнення, підвищення стабільності й біодоступності. Незважаючи на активні розробки в молочних, напівтвердих і рідких харчових системах [3, 6, 22], використання інкапсульованих речовин у м'ясних фаршевих виробках, зокрема в паштетах, вивчено недостатньо.

Важливо підкреслити, що м'ясна матриця паштету має специфічні властивості (низький рН, редокс-активні іони, високу жирність), які ускладнюють збереження інкапсулятів і потребують індивідуального підходу до вибору носія, оболонки та режиму обробки [4, 14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хоча тема інкапсуляції функціональних інгредієнтів у харчовій науці набула широкого поширення, більшість сучасних досліджень проводиться на модельних або не м'ясних системах, що обмежує можливість безпосереднього застосування їх результатів до складних структур, як-от паштети з курячої печінки.

Зокрема, низка робіт присвячена створенню мікро-і наноемульсій для покращення стабільності біоактивних компонентів: Gutiérrez-Álzate et al. [1] описують капсулювання пробіотиків у продуктів тваринного походження, однак більшість експериментів проведені у модельних кисломолочних або десертних системах. Подібні зауваження стосуються також робіт Teixe-Roig et al. [12] та Ojeda-Piedra et al. [10], де досліджено стабільність капсул в умовах напоїв або соусів, без включення реальних термічних режимів, характерних для виробництва паштетів (85–95 °C).

Численні дослідження щодо інкапсуляції антиоксидантів (напр. Su et al. [2], Calderón Oliver & Ponce Alquicira [5], Ozkan et al. [22]) демонструють перспективні результати у системах без окислювального навантаження, пов'язаного з гемовим залізом або високою жирністю. Зокрема, у роботах [5, 22] практично не розглянуто взаємодії активних речовин із $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, що критично для м'ясної печінкової сировини.

У джерелах, присвячених вітамінам і мінералам (Muñoz More et al. [3], Reñuñuri-Pacheco et al. [17]),

також домінують моделі, не адаптовані до паштетів. Наприклад, Muñoz More et al. [3] зосереджуються на сенсорній сумісності інкапсульованого заліза в напоях, тоді як у м'ясних продуктах додавання солей Fe^{2+} супроводжується ризиком металевих присмаків і потемніння, особливо за наявності білків і жирів.

Щодо методів капсулювання, найбільше досліджені коацервація (Doshi et al. [6], Alrosan et al. [21]) та спреї-сушіння (Mardani et al. [8]), але знову ж таки – ці процеси переважно перевірялись на ізольованих розчинах білків, полісахаридів або олій, а не в білково-жирових матрицях з м'якою термообробкою. Робота Alrosan et al. [21] містить цікаві дані про стійкість коацерватів із рослинних білків, однак не враховує вплив компонентів тваринного походження, які домінують у паштетах.

Навіть ті дослідження, що стосуються м'ясних продуктів напряму – зокрема Šiška et al. [20], Montone et al. [13], Cittadini et al. [14] та Mehaya et al. [19] – здебільшого стосуються ковбас, бургерів або пюреподібних продуктів без емульгової структури з печінки. Лише Šiška et al. [20] частково описують текстурні особливості печінкового паштету, але без оцінки ефективності функціональних оболонок. Подібно, дослідження Martínez et al. [15] та Leone Zabot et al. [24] моделюють інкапсуляцію жирів або біоактивів, але знову ж таки – без реальної адаптації до паштетної термостійкої структури.

Ще одна прогалина – відсутність адаптованого математичного апарату. У роботах [25], а також [23], представлено моделі вивільнення вітамінів або поліфенолів, але вони апробовані на емульсіях без білкової або ліпідної агресії. Практично жодна з моделей не верифікована в умовах паштетної системи, де спостерігається структурна в'язкість, каталітична активність заліза і механічне навантаження при фаршуванні.

Метою статті є систематизований огляд сучасних літературних джерел щодо застосування інкапсуляційних технологій у виробництві паштетів з курячої печінки, з акцентом на вибір типів матриць, методів інкапсуляції, стабільність функціональних інгредієнтів і потенціал для промислового впровадження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Паштет із курячої печінки є багатокомпонентною харчовою системою з емульговою структурою, яка включає білки, ліпіди, воду, мінерали та біоактивні сполуки. Основу продукту становить печінкова сировина, яка містить високий рівень гемового заліза, жиророзчинних вітамінів (A, D, E), ферментів і поліненасичених жирних кислот [1, 3, 16]. У присутності кисню ці компоненти здатні каталізувати інтенсивне окиснення ліпідів і білків, що призводить до утворення альдегідів, кетонів та інших вторинних продуктів деградації, які погіршують органолептичні властивості [7, 10, 19].

Крім високої поживної цінності, паштети характеризуються низьким рН (4,5–6,0), значною вологістю, наявністю емульгованих жирів і стабілізуючих агентів (желатин, бульйон, білки), що визначає їх як потенційно придатну матрицю для доставки

інкапсульованих інгредієнтів. Порівняно м'яка термічна обробка (85–95 °C) сприяє збереженню мікро- і наноструктурованих форм, за умови правильно підбраного носія [4, 13, 15]. Разом із тим, паштет має низку обмежень: висока активність катіонів $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, схильність до пероксидного окиснення, ферментативна дестабілізація, які ускладнюють стабільність вітамінів, поліфенолів і пробіотиків навіть в інкапсульованій формі [5, 11, 17]. Також емульгована структура сприяє можливій нерівномірності розподілу капсул, що слід враховувати при виборі носія та методу введення.

Таким чином, курячо-печінковий паштет водночас виступає як технологічно перспективна та біохімічно складна платформа для включення інкапсульованих функціональних речовин. Ефективне капсулювання можливе лише за умови урахування специфіки матриці, зокрема жирності, окисної активності та параметрів термообробки.

Для ефективної інкапсуляції функціональних речовин у м'ясних продуктах критично важливим є вибір матеріалу для оболонки, оскільки він має бути сумісним із харчовою системою, термостійким, нетоксичним та здатним забезпечувати контрольоване вивільнення активної сполуки. У контексті м'ясних виробів, зокрема паштетів із курячої печінки, найбільш дослідженими й потенційно застосовними є три групи матричних систем: полімерні, білкові та полісахаридні носії [1, 2].

Полімерні матриці, зокрема полілактид (PLA) і полі (молочно-ко-гліколева кислота) (PLGA), демонструють високу термостійкість і захист гідрофобних речовин, таких як ефірні масла, жиророзчинні вітаміни або каротиноїди. Однак, через свою гідрофобність, такі капсули можуть злипатися в жировій фазі паштету, що ускладнює їх рівномірний розподіл [3]. До того ж, PLA-похідні системи потребують регуляторної оцінки для використання в продуктах тваринного походження.

Білкові носії – желатин, казеїни, сироваткові білки – широко застосовуються у харчовій промисловості завдяки харчовій безпечності та функціональним властивостям. Желатинові мікрокапсули мають добру термостійкість, а також здатність утримувати поліфеноли, антиоксиданти та леткі ароматичні сполуки [4]. Водночас, білкові капсули можуть бути чутливими до рН середовища та присутності солей, які є типовими для м'ясної продукції.

Полісахаридні матриці, як-от мальтодекстрин, альгінати, пектин і камеді, характеризуються доброю

водорозчинністю, низькою реактивністю та утворенням захисної плівки під час сушіння. Вони ідеально підходять для інкапсуляції водорозчинних вітамінів, органічних кислот, пробіотиків. Проте чисті полісахариди можуть мати недостатню механічну міцність при термообробці м'ясного фаршу [5].

Найбільшу ефективність у системах типу «паштет» демонструють комбіновані білково-полісахаридні оболонки, які поєднують стабільність білків із структуроутворювальною здатністю полісахаридів. Наприклад, коацервати на основі сироваткового білка та альгінату забезпечують кращу стійкість капсул до зміни рН, температури та присутності іонів металів [6]. Подібні системи вже демонструють позитивні результати у модельних м'ясних продуктах, однак потребують подальшого тестування саме в паштетах на основі печінки.

Таким чином, вибір матричного матеріалу має базуватися на хімічній природі активної речовини, умовах термообробки, взаємодії з м'ясною матрицею та кінцевому ефекті, якого очікує розробник. Перевагу варто надавати комбінованим системам, адаптованим під специфіку фаршевих білково-жирових структур які зображено в таблиці 1.

Інкапсуляція функціональних речовин у м'ясній промисловості вимагає застосування методів, які забезпечують стабільність активних компонентів у технологічному середовищі та не порушують структуру готового продукту. До найбільш релевантних для паштетів з курячої печінки належать: спреї-сушіння, коацервація, наноемульгування та іонна гелеутворювальна інкапсуляція [1, 2].

Спреї-сушіння є одним із наймасштабованіших методів, що широко використовується для створення сухих концентратів з інкапсульованими вітамінами, ароматизаторами, антиоксидантами. Метод базується на розпиленні емульсії з активною речовиною і носієм у потоці гарячого повітря. Основними перевагами є технологічна простота, доступне обладнання та стабільність отриманих мікрокапсул. Для м'ясної галузі цей метод особливо зручний, оскільки капсули можуть вводитись безпосередньо на етапі змішування фаршу. Недоліком є часткова деградація термолабільних сполук та втрата летких ароматів при високих температурах [3, 8].

Коацервація базується на утворенні двофазної системи між білковими та полісахаридними компонентами, які обволікають активну речовину. Метод забезпечує м'які умови капсулювання, високу ефективність

Таблиця 1 – Характеристика матричних систем для інкапсуляції у м'ясних паштетах

Тип матриці	Приклади	Переваги	Недоліки	Придатність до паштету
Полімерна	PLA, PLGA	Термостійкість, інертність	Гідрофобність, вартість	Умовна
Білкова	Желатин, казеїн	Харчова сумісність, стабільність	Чутливість до рН/солей	Висока
Полісахаридна	Альгінат, пектин	Водорозчинність біосумісність	Слабка термостійкість	Помірна
Комбінована	Сироватковий білок+альгінат	Оптимальні властивості	Складність приготування	Найвища

Джерело: сформовано за [1–6]

інкапсуляції, можливість регулювання розміру часток. Зокрема, коацервати на основі сироваткового білка та альгілату демонструють підвищену стабільність до змін рН та температури, що актуально для м'ясної продукції. У паштетах коацервати можуть рівномірно розподілятися у структурі без порушення текстури, за умови відповідної в'язкості системи. За даними [6, 21] такі системи ефективно інкапсулюють поліфеноли, ароматичні та вітамінні комплекси.

Наноемульгування дозволяє створювати високостабільні системи з розміром частинок до 200 нм. Цей підхід є ефективним для інкапсуляції гідрофобних речовин (ефірних масел, каротиноїдів, вітамінів А, D, Е), які добре взаємодіють із жировою фазою паштету. Перевагами є стабільність дисперсії, висока біодоступність інгредієнтів та можливість створення прозорих систем. Основним обмеженням залишається необхідність використання складних емульгаторів і високих тисків гомогенізації, що підвищує собівартість і ускладнює промислове застосування в умовах невеликих м'ясопереробних підприємств.

Іонна гелеутворювальна інкапсуляція (зокрема з використанням альгілату в присутності іонів кальцію) дозволяє формувати гелеві мікрокапсули з високою біосумісністю. Цей метод активно застосовується для захисту пробіотичних культур, ферментів та антимікробних агентів. Проте, у м'ясній продукції такі капсули можуть бути нестійкими до механічного впливу при перемішуванні фаршу та тепловій обробці. Їх застосування можливе здебільшого для створення структурованих вкраплень або як доповнення до базової рецептури, а не як основна система доставки [9, 11].

Жоден з методів не є універсальним. Для паштетів, які мають однорідну, пастоподібну консистенцію і піддаються термічній обробці, найбільш перспективними є спрей-сушіння (для термостійких речовин) та коацервація (для поліфенолів, вітамінів, летких ароматичних компонентів). Наноемульсії та гелеві капсули можуть бути застосовані в комбінації або для спеціалізованих функціональних цілей, але потребують адаптації під конкретні технологічні умови. Порівняльна характеристика методів інкапсуляції для паштетної продукції зображено в таблиці 2.

Інкапсуляція функціональних інгредієнтів у м'ясних продуктах, зокрема паштетах, дозволяє не лише зберегти активність біосполук, але й регулювати їх вивільнення, забезпечити стабільність у складних білково-жирових системах і розширити функціональні властивості

кінцевого продукту. В залежності від технологічної мети розрізняють декілька основних напрямів застосування інкапсуляції: антиоксидантний захист, збагачення нутрієнтами, стабілізація аромату, мікробіологічна безпека та пробіотична функціональність [1, 2].

Антиоксиданти. Інкапсуляція антиоксидантів пригнічує окиснення ліпідів і білків у печінкових продуктах. Токофероли, поліфеноли, лікопен та рослинні екстракти у капсульованій формі краще зберігаються під час нагрівання і діють довше, знижуючи TBARS на 30–45 % [3, 16].

Вітаміни та мінерали. Інкапсуляція вітамінів (А, D, Е, К, В, С) захищає їх від деградації при обробці та зберіганні. Для вітамінів С і В12 це особливо важливо через взаємодію із залізом. Капсули забезпечують понад 85 % збереження активності після 90 °С, а інкапсульоване залізо зменшує небажані смакові та колірні зміни [17, 3, 20].

Ароматичні речовини. Інкапсуляція летких сполук (ефірні олії, спеції) зменшує їх втрати при нагріванні, маскує небажані присмаки та дозволяє контролювати інтенсивність аромату. Зазвичай зберігається до 60–70 % летких компонентів після пастеризації [10, 14, 19].

Пробіотики. Через низьку термостійкість їх застосування обмежене, однак інкапсуляція (альгілат, пектин) дозволяє зберегти 60–70 % клітин після 75–80 °С та частково підвищити мікробіологічну безпеку продукту [1, 18, 11].

Антимікробні речовини. Інкапсульовані природні консерванти (рослинні екстракти, хітозан, органічні кислоти) пригнічують мікрофлору; зниження становить близько 2 log CFU/г за 10 діб при 4 °С, із пролонгованою дією та маскуванням смаку [11, 19]. Отже, вибір компонента та форми інкапсуляції визначається типом м'ясної матриці, бажаним ефектом, стабільністю речовини й умовами обробки. Найбільш відпрацьованими є антиоксидантна та вітамінна стабілізація, тоді як пробіотики й антимікробні агенти потребують подальшої адаптації.

Для узагальнення підходів сформовано таблицю 3, що систематизує функціональні інгредієнти, носії, методи інкапсуляції, очікувані ефекти та рівень дослідженості для паштетів. Вона дозволяє визначити ефективні рішення й окреслити наукові прогалини (зокрема щодо пробіотиків і ароматичних компонентів), формуючи основу для подальших досліджень.

Інкапсуляція функціональних інгредієнтів у складі м'ясних паштетів сприяє покращенню основних

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика методів інкапсуляції для паштетної продукції

Метод	Переваги	Недоліки	Придатність до паштету
Спрей-сушіння	Масштабованість, стабільність	Термічні втрати та летких сполук	Висока
Коацервація	М'які умови, ефективне капсулювання	Чутливість до рН, складність контролю	Висока
Наноемульгування	Висока біодоступність, стабільність	Вартість, технологічна складність	Помірна
Іонне гелеутворення	Біосумісність, збереження пробіотиків	Нестійкість до механіки та нагріву	Низько-помірна

Джерело: наведені показники сформовано з [1, 2, 6, 8, 10, 14, 19, 21]

Таблиця 3 – Напрями застосування інкапсульованих функціональних інгредієнтів у паштетах

Тип функціонального інгредієнта	Ціль інкапсуляції	Рекомендовані носії	Метод інкапсуляції	Переваги для паштетів	Рівень дослідженості
Антиоксиданти (поліфеноли, токоферолі)	Пригнічення ліпідного окиснення, стабілізація якості під час зберігання	Мальтодекстрин, білково-полісахаридні коацервати	Спрій-сушіння, коацервація	Зменшення TBARS, збереження кольору та запаху	Досліджено в м'ясних фаршах, обмежено в паштеті
Вітаміни (A, D, E, B12, C)	Захист від термодеструкції та впливу Fe^{2+}/Fe^{3+}	Альгінат, сироватковий білок, PLA	Спрій-сушіння, наноемульгування	>85% вітаміну зберігається при 90°C, покращення біодоступності	Є паштетна модель без математичного опису
Ароматичні речовини (ефірні олії, спеції)	Збереження летких компонентів, контроль аромату	Мальтодекстрин, білково-ліпідні капсули	Спрій-сушіння, коацервація	До 70% летких сполук зберігається після пастеризації	Немає досліджень в потрібній матриці
Пробіотики (<i>Lactobacillus</i> , <i>Bifidobacterium</i>)	Захист клітин від тепла, солей, кислот	Альгінат-кальцій, пектин, желатин	Іонне гелеутворення, коацервація	До 60–70% виживаності після термообробки	Відсутні моделі для паштет паш систем
Антимікробні речовини (екстракти, хітозан)	Пролонгована антимікробна дія, маскування смаку	Альгінат, хітозан, ліпідні капсули	Спрій-сушіння, іонне гелеутворення	Зменшення мікробного навантаження	Паштети лише часткова вивчені

Джерело: сформовано з [1, 3, 10, 12, 13, 19, 20, 21, 22]

якісних характеристик продукту, включаючи фізико-хімічну стабільність, сенсорні властивості, текстурні параметри, мікробіологічну безпеку та нутритивну цінність. Вибір матеріалу оболонки, розміру капсул і способу введення значною мірою визначає ступінь впливу на структуру паштетної системи [2, 4].

Окислювальна стабільність. Одним із найпомітніших ефектів інкапсуляції є зменшення інтенсивності ліпідного окиснення, що в м'ясних продуктах часто каталізується присутністю гемового заліза. Використання мікрокапсул із поліфенолами, токоферолом, лікопеном або екстрактами розмарину дозволяє знизити вміст малонового діальдегіду (TBARS) на 25–45 % порівняно з неконденсованими формами. Це забезпечує збереження кольору, запаху та смакових характеристик продукту під час зберігання [3, 16, 19].

Сенсорні властивості. Інкапсуляція ароматичних компонентів дозволяє уникнути надмірної інтенсивності спецій або гіркоти, забезпечити рівномірний аромат у всьому об'ємі продукту та контрольоване вивільнення смакових сполук під час споживання. Наприклад, введення мікрокапсул із ефірними маслами часнику або перцю позитивно впливає на післясмак і загальне сенсорне сприйняття за рахунок збереження летких речовин після термообробки [10, 14, 19].

Текстурні характеристики. Тип і концентрація капсул впливають на структуру паштету: при вмісті понад 2 % альгінатні чи пектинові гелі можуть знижувати когезивність і пружність через порушення однорідності. Натомість білкові або комбіновані мікрокапсули, що добре диспергуються, майже не змінюють текстуру, а інколи навіть покращують спредабельність і стабільність емульсії [13, 20].

Мікробіологічна стабільність. Інкапсульовані природні консерванти (хітозан, органічні кислоти,

екстракти спецій) пригнічують умовно-патогенну мікрофлору: при 4 °C протягом 10 діб її рівень знижується на 1,5–2,0 log CFU/г завдяки контрольованому вивільненню активних речовин [11, 19].

Біодоступність. Інкапсуляція підвищує стійкість і контрольоване вивільнення вітамінів та антиоксидантів; Pickering-емульсії, ліпідні капсули й коацервати збільшують біодоступність жиророзчинних вітамінів у 1,5–2 рази [23, 24, 6]. Однак ці результати здебільшого отримані на нем'ясних моделях і потребують підтвердження для паштетів.

З огляду на складність м'ясної матриці, ефективність інкапсуляції слід оцінювати комплексно – з урахуванням взаємодій у системі. Перспективними є *in vitro* моделі травлення та мікроструктурний аналіз оболонки у білково-жировому середовищі [25]. Незважаючи на активний розвиток інкапсуляційних технологій у харчовій промисловості, математичне моделювання стабільності інкапсульованих функціональних речовин у білково-жирових матрицях, зокрема в м'ясних паштетах, залишається недостатньо дослідженим напрямом. Більшість існуючих моделей деградації або вивільнення біоактивних компонентів розроблено для молочних, напоїв або гелевих систем, які істотно відрізняються за хімічним складом, структурою та термічним навантаженням [24, 25].

У харчовій науці найбільш поширеними є такі математичні моделі:

- Модель нульового порядку (Zero-order): описує ситуації, коли швидкість деградації активної речовини не залежить від її концентрації. Застосовується переважно у водних або ізольованих системах з постійною температурою.

- Модель першого порядку (First-order): базується на пропорційності швидкості деградації до поточної

концентрації інгредієнта. Часто використовується для опису розпаду вітамінів і пробіотиків [25].

- Модель Хігучі (Higuchi): описує дифузійне вивільнення речовини з матриці, найчастіше використовується в плівках і капсулах із заданою товщиною оболонки [24].

- Модель Вейбулла (Weibull): гнучка емпірична модель, що дозволяє описувати складні та нелінійні процеси вивільнення або деградації в залежності від часу, структури матриці, pH та інших змінних [25].

Ці моделі активно застосовувалися в дослідженнях на напівтвердих і рідких харчових продуктах, зокрема для прогнозування стабільності антиоксидантів, вітамінів, поліфенолів та пробіотичних культур [23, 24]. Однак для м'ясних паштетів вони ще не адаптовані, хоча така необхідність очевидна через наявність специфічних факторів:

- висока жирність (до 30 %), що впливає на розчинність гідрофобних речовин;
- присутність гемового заліза, яке каталізує окиснення;
- емульгована структура, що порушує лінійні закономірності вивільнення;
- помірна термообробка, що частково руйнує оболонкові матеріали.

Адаптація існуючих моделей до умов м'ясної матриці потребує врахування комплексних взаємодій між інкапсульованою речовиною, оболонкою, структуроутворюючими компонентами (білками, жирами) та технологічними факторами (pH, температура, вологість, механічне змішування). Зокрема, для паштетної системи доцільним є апробація моделей Вейбулла або Хігучі, як найбільш придатних до опису нелінійного вивільнення та деградації речовин у складних матрицях [25].

Для практичного застосування математичного моделювання в технології паштетів доцільним є створення базових *in vitro* моделей, які імітують умови теплової обробки, охолодженого зберігання та шлунково-кишкового середовища. Це дозволить розраховувати термін стабільності функціональних компонентів та оптимізувати рецептурний склад, враховуючи не лише якісний, але й кількісний аспект збереження функціональності [23, 25].

Таким чином, розвиток математичного моделювання в контексті інкапсульованих інгредієнтів у м'ясній продукції є перспективним напрямом, що поєднує технологію, біохімію та прогнозування терміну придатності. Подальші дослідження у цьому напрямі можуть сприяти науково обґрунтованому проектуванню функціональних м'ясних продуктів з прогнозованою стабільністю.

Інтеграція інкапсульованих функціональних речовин у виробництво паштетів з курячої печінки має потенціал як з технологічної, так і з ринкової точки зору. З одного боку, це відкриває можливості створення нових продуктів з підвищеною біологічною цінністю, антиоксидантною активністю та подовженням терміном

зберігання [14, 15, 16]. З іншого – потребує адаптації виробничого процесу, закупівлі додаткових інгредієнтів і обґрунтування економічної доцільності [18, 19].

З технологічної позиції інкапсульовані інгредієнти можуть бути введені на етапі змішування фаршу або емульгування печінкової маси. Це не потребує радикальних змін у рецептурі або обладнанні за умови використання сухих капсул, одержаних методом спреїсушіння [8]. Водночас рідкі або гелеподібні інкапсуляти вимагають точнішого дозування, контролю за в'язкістю маси і запобігання розриву оболонок під час механічної обробки [11, 12].

Важливо враховувати, що деякі типи капсул можуть впливати на колір, аромат, текстуру або стабільність емульсії [13, 20]. Тому доцільним є попереднє проведення лабораторних випробувань для кожного конкретного капсулюваного компонента з урахуванням рецептури, режиму термообробки та тривалості зберігання. Для кращої стабільності й уніфікованості дозування рекомендовано використовувати готові мікрокапсульовані добавки від промислових виробників з підтвердженою якістю [15, 19].

З економічної точки зору, застосування інкапсульованих речовин може підвищити собівартість готового продукту на 10 – 20%, залежно від типу носія, активної речовини та способу інкапсуляції [19, 25]. Водночас така продукція може позиціонуватися як функціональна, преміальна або спеціального призначення (наприклад, збагачена залізом, антиоксидантами або пробіотиками), що відкриває нові сегменти споживчого попиту. При правильному маркетинговому супроводі це дає змогу компенсувати витрати за рахунок більшої доданої вартості [17].

Особливо перспективним є використання інкапсульованих натуральних консервантів, що зменшує частку синтетичних добавок і відповідає концепції «чистої етикетки» [10, 11]. Такі інгредієнти (ефірні олії, екстракти, вітаміни, поліфеноли) поєднують технологічну та маркетингову функції.

Водночас впровадження потребує підготовки персоналу, контролю якості капсул і відповідності нормативним вимогам, що є викликом для малого та середнього бізнесу [14, 22].

Отже, використання інкапсульованих компонентів у паштетах є реалістичним за умови правильного підбору інкапсулятив. Економічна ефективність залежить від ринку, попиту та очікуваної доданої цінності.

Найбільш придатні методи – спреїсушіння та коацервація; вони забезпечують збереження функціональних речовин без суттєвих змін технології, хоча потребують адаптації рецептури.

Інкапсульовані інгредієнти покращують якість (менше окиснення, кращий аромат і структура), але використання пробіотиків і натуральних консервантів потребує додаткової оптимізації.

Математичне моделювання (Вейбулла, Хігучі) поки недостатньо розвинене й потребує подальших досліджень для м'ясних систем.

Загалом інкапсуляція є перспективним напрямом для створення функціональних м'ясних продуктів і потребує подальшої оптимізації технологій та прогнозування стабільності компонентів [24].

Висновки. З літературного огляду встановлено, що інкапсуляційні технології розширюють функціональність м'ясних паштетів (зокрема з курячої печінки), підвищуючи стабільність біоактивних речовин, сенсорні властивості та термін зберігання. Найбільш ефективними є білкові, полісахаридні та комбіновані матриці, що захищають чутливі інгредієнти під час термообробки.

Оптимальними методами є спрей-сушіння та коацервація, які дозволяють зберігати антиоксиданти, вітаміни, ароматичні речовини і частково пробіотики.

Введення капсул у фарш не потребує суттєвих змін технології, але вимагає адаптації рецептури та носіїв.

Інкапсульовані інгредієнти покращують якість паштетів (менше окиснення, кращий аромат і структура), однак застосування пробіотиків і природних консервантів потребує додаткової технологічної оптимізації.

Моделювання стабільності (моделі Вейбулла, Хігучі) залишається недостатньо розвиненим і потребує подальших досліджень для м'ясних систем.

З технологічної та економічної точки зору інкапсуляція є перспективною, особливо при використанні готових капсул, що дозволяє створювати функціональні продукти з доданою цінністю. Загалом, напрям потребує подальших досліджень щодо оптимізації носіїв і прогнозування стабільності у складних харчових системах.

Список використаних джерел:

1. Alrosan, M., Al Rabadi, N., Alu'datt, M. H., et al. Complex coacervation of plant-based proteins and polysaccharides: Sustainable encapsulation techniques for bioactive compounds. *Food Engineering Reviews*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09408-7>
2. Calderón Oliver, M., & Ponce Alquicira, E. The role of microencapsulation in food application. *Molecules*. 2022. № 27 (5). P. 1499. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27051499>
3. Carpes, S. T., Pereira, D., Moura, C., Reis, A. S., Silva, L. D., Oldoni, T. L. C., Almeida, J. F., & Plata-Oviedo, M. V. S. (2020). Lyophilized and microencapsulated extracts of grape pomace from winemaking industry to prevent lipid oxidation in chicken pâté. *Brazilian Journal of Food Technology*. 2020. № 23, P. e2019112. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.11219>
4. Chaabane, D., Yakdhane, A., Vatai, G., Koris, A., & Nath, A. Microencapsulation of extra virgin olive oil by dehydration of emulsion. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2022. № 66 (3). P. 354–366. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPCh.19587>
5. Cittadini, A., Muneke, P. E. S., Pateiro, M., Sarriés, M. V., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. Microencapsulated healthy oil mixtures to enhance the quality of foal pâtés. *Foods*. 2023. № 12 (3), P. 553. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030553>
6. Doshi, N., Guo, W., Chen, F., Venema, P., Shum, H. C., de Vries, R., & Li, X. Simple and complex coacervation in systems involving plant proteins. *Soft Matter*. 2024. № 20. P. 1966. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3SM01275A>
7. Giovani Leone Zabot, G. L., Rodrigues, F. S., Ody, L. P., Tres, M. V., et al. Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Polymers*. 2022. № 14 (19) P. 4194. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14194194>
8. Gutiérrez-Álzate, K., Beltrán-Cotta, L. A., dos Santos Rekowsky, B. S., Cavalheiro, C. P., & da Costa, M. P. Micro- and nanoencapsulation of probiotics: Exploring their impact on animal-origin foods. *ACS Food Science & Technology*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00776>
9. Kučuk, N., Primožič, M., Knez, Ž., & Leitgeb, M. Alginate beads with encapsulated bioactive substances from *Mangifera indica* peels as promising peroral delivery systems. *Molecules*. 2023. № 28 (3). P. 1105. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28031105>
10. Lu, X., & Huang, Q. Stability and in vitro digestion study of curcumin encapsulated Pickering emulsions. *Food & Function*. 2020. № 11 (1). P. 606–616. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9FO02029B>
11. Malekjani, N., & Jafari, S. M. Modeling the release of food bioactive ingredients from carriers/nanocarriers by the empirical, semi empirical and mechanistic models. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. № 19 (6). P. 2325–2354. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12660>
12. Mardani, M., Siahtiri, S., Besati, M., Baghani, M., Baniassadi, M., & Mahdavi Nejad, A. Microencapsulation of natural products using spray drying: An overview. *Journal of Microencapsulation*. 2024. № 41 (7). P. 649–678. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2389136>
13. Martínez, E., Rabadán, A., Álvarez-Ortí, M., Mitre, J., & Pardo, J. E. Fat reduction and lipid profile optimization in Spanish spreadable meat product using an oil-in-water emulsion. *European Food Research and Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-025-04682-5>
14. McClements, D. J., Das, A. K., Dhar, P., Nanda, P. K., & Chatterjee, N. Nanoemulsion-based technologies for delivering natural plant-based antimicrobials in foods. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, № 5, Article 2021. P. 643208. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.643208>
15. Mehaya, F. M., Salem, S. H., Mohammad, A. A., Amer, H. M., & Kang, W. Microencapsulated oregano essential oil as a natural preservative of beef burger during refrigerated storage. *Journal of Food Quality*. 2024. P. 8012877. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/8012877>
16. Montone, A. M. I., Malvano, F., Taiano, R., Capparelli, R., Capuano, F., & Albanese, D. Alginate coating charged by hydroxyapatite complexes with lactoferrin and quercetin enhances the pork meat shelf life. *Foods*. 2023. № 12 (3). P. 553. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030553>

17. Muñoz More, H. D., Nole Jaramillo, J. M., Valdiviezo Marcelo, J., Espinoza Delgado, M. P., Socola Juarez, Z. M., Ruiz Flores, L. A., & Espinoza Espinoza, L. A. Microencapsulated iron in food: Techniques, coating material, efficiency, and sensory analysis – a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2023. № 7. P. 1146873. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1146873>
18. Ojeda-Piedra, S. A., Zambrano-Zaragoza, M. L., González-Reza, R. M., García-Betanzos, C. I., Real-Sandoval, S. A., & Quintanar-Guerrero, D. Nanoencapsulated essential oils as a preservation strategy for meat and meat products storage. *Molecules*, 2022. № 27 (23), 8187. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27238187>
19. Ortiz Sánchez, C. A., Guevara Valencia, M., Figueiras Carrillo, A. E., Bravo Ariza, K., Brenis Dzul, A., & Hernández Aguilar, E. Development and characterization of rainbow trout pâté supplemented with Serrano chili microcapsules. *Biology and Life Sciences Forum*, 2023. № 26 (1), 82. DOI: <https://doi.org/10.3390/Foods2023-14996>
20. Ozkan, G., Kostka, T., Esatbeyoglu, T., & Capanoglu, E. Effects of lipid based encapsulation on the bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds. *Molecules*, 2020. № 25 (23), P. 5545. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25235545>
21. Peñuñuri-Pacheco, N., Moreno-García, Y. A., González-Ríos, H., Astiazarán-García, H., López-Franco, Y. L., Tortoledo-Ortiz, O., Pérez-Báez, A. J., Dávila-Ramírez, J. L., Lizardi-Mendoza, J., & Valenzuela-Melendres, M. Optimization of the encapsulation of vitamin D₃ in oil-in-water nanoemulsions: Preliminary application in a functional meat model system. *Foods*, 2024. № 13 (17), P. 2842. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13172842>
22. Saffarian, H., Rahimi, E., Khamesipour, F., & Hashemi Dehkordi, S. M. Antioxidant and antimicrobial effect of sodium alginate nanoemulsion coating enriched with oregano essential oil (*Origanum vulgare* L.) and *Trachyspermum ammi* oil on food pathogenic bacteria. *Food Science & Nutrition*, 2024. № 12. P. 2985–2997. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3979>
23. Šiška, L., Gál, R., Štefunko, F., Polášek, Z., Lazárková, Z., Pětová, M., Trvdň, Z., & Salek, R. N. Quality evaluation of chicken liver pâté affected by algal hydrocolloids addition: A textural and rheological approach. *Animals*. 2024. № 14 (18). P. 2715. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani14182715>
24. Su, L., Nian, Y., & Li, C. Microencapsulation to improve the stability of natural pigments and their applications for meat products. *Food Materials Research*. 2023. № 3, Article 10. DOI: <https://doi.org/10.48130/FMR-2023-0010>
25. Teixe-Roig, J., Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., & Martín-Belloso, O. Enhancing the gastrointestinal stability of curcumin by using sodium alginate-based nanoemulsions containing natural emulsifiers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. № 24 (1). P. 498. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24010498>

Roman Svyatnenko

National University of Food Technologies

Anna Korsun

SE “Poltavastandartmetrologiya”

Andrii Marynin, Vasyl Pasichnyi, Oleksandr Shevchenko

National University of Food Technologies

APPLICATION OF ENCAPSULATION TECHNOLOGIES IN CHICKEN LIVER MEAT PÂTÉS

The article presents an analytical review of contemporary scientific sources regarding the application of encapsulation technologies in the production of meat pâtés made from chicken liver as a promising direction for developing functional food products. Special attention is given to the justification of selecting types of encapsulation matrices, in particular polymer, protein, and polysaccharide systems, as well as their combined formulations, which ensure effective protection of bioactive components within a complex protein–fat meat system. The main methods of capsule formation are considered, including spray drying, coacervation, and nanoemulsification, taking into account their technological features, advantages, and limitations when applied in comminuted meat products. The functional capabilities of encapsulating antioxidants, vitamins, probiotics, aromatic, and antimicrobial substances are described, contributing to improved stability, bioavailability, and preservation of product quality during storage. At the same time, specific challenges associated with the chemical and structural characteristics of the pâté matrix are identified, particularly the presence of heme iron, emulsified fats, active redox processes, and pH variations, which may affect the stability of encapsulated substances and the efficiency of their release. Approximately 25 scientific sources were analyzed, including recent international and domestic studies, which allowed for the generalization of existing approaches and the determination of the degree of their adaptation to meat systems. It was established that, despite the rapid development of encapsulation technologies in the food industry, their practical application in pâté production remains limited and requires further experimental and technological research. The study formulates key approaches to the use of encapsulation in meat products and substantiates directions for future research aimed at developing innovative functional products with improved stability, safety, and enhanced sensory characteristics.

Keywords: encapsulation, chicken liver pâté, bioactive compounds, polymer carriers, functional ingredients, stability, meat matrix, spray drying, antioxidants, probiotics.

Дата надходження статті: 02.04.2026

Дата прийняття статті: 23.04.2026

Дата публікації статті: 29.05.2026