

Котов Олексій Олександрович

кандидат економічних наук,

старший викладач кафедри харчових технологій,

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6137-9363>

Хричов Сергій Олександрович

асистент кафедри міжнародного туризму та готельно-ресторанного бізнесу,

Університет митної справи та фінансів

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4864-7769>

Слободнюк Руслан Євгенійович

кандидат технічних наук, викладач-методист,

Дніпровський технологічно-економічний фаховий коледж

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0994-3181>

Горальчук Андрій Богданович

доктор технічних наук, професор,

науковий співробітник,

Університет Торонто Метрополітен, Канада

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2442-7642>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТРУКТУРУВАННЯ РОСЛИННИХ БІЛКІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ М'ЯСНИХ АНАЛОГІВ

У статті узагальнено та систематизовано результати вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень 2021–2026 рр., присвячених застосуванню текстурованих рослинних білків у технологіях виробництва м'ясних аналогів. Проаналізовано сучасну сировинну базу, що включає соєві, горохові, пшеничні (глутенові) білки, білки інших бобових культур, а також їх композиційні суміші з урахуванням амінокислотного складу, функціонально-технологічних властивостей та наявності антипоживних факторів. Оцінено вплив методів попередньої підготовки сировини та екстракції білка на структуроутворювальну здатність, водотривалі властивості, харчову цінність і біодоступність білка в кінцевих продуктах. Особливу увагу приділено екструзійним методам структурування білків, зокрема низьковологісній (ЛМЕ) та високовологісній (НМЕ/НММА) екструзії, які розглядаються як ключові технологічні підходи формування волокнистої анізотропної структури, максимально наближеної до м'язової тканини. Детально проаналізовано фізико-хімічні механізми текстуроутворення, включаючи термічну денатурацію білкових фракцій, їх орієнтацію в полі зсувних напружень, фазове розширення та визначальну роль охолоджувальної матриці у стабілізації структури. Встановлено взаємозв'язок між основними параметрами екструзійного процесу (вологість, температурний режим, швидкість обертання шнека, питомі механічні енерговитрати, інтенсивність охолодження) і текстурними, реологічними та сенсорними характеристиками м'ясних аналогів. Особливо розглянуто питання харчової цінності та засвоюваності рослинного білка, потенційні ризики перебігу реакцій Майяра й окиснювальних процесів під час високотемпературної обробки, а також сучасні технологічні стратегії керування смако-ароматичним профілем і маскування небажаних «beany/off-flavors». Узагальнені результати формують науково-практичне підґрунтя для цілеспрямованого проектування рецептур і технологічних процесів виробництва м'ясних аналогів із прогнозованими показниками якості, харчової цінності та споживчої привабливості.

Ключові слова: текстуровані рослинні білки; м'ясні аналоги; високовологісна екструзія; низьковологісна екструзія; засвоюваність; аромат; функціонально-технологічні властивості.

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні харчові системи перебувають під тиском екологічних і ресурсних обмежень та зростаючого попиту на білок. У цьому контексті м'ясні аналоги на рослинній основі розглядають як один із шляхів диверсифікації білкової пропозиції та зменшення ресурсомісткості традиційного тваринництва. Водночас ключовою технологічною проблемою plant-based продуктів залишається

відтворення структурно-механічних характеристик м'язової тканини (волокнистість, жувальність, соковитість) при одночасному збереженні високої харчової цінності та привабливого смако-ароматичного профілю [1–3, 15].

Текстуровані рослинні білки (ТРБ) є базовим інгредієнтом для більшості категорій м'ясних аналогів, а екструзійні процеси (особливо високовологісні) у



2021–2026 рр. стали центральним об’єктом наукової уваги в межах підходу «structure–process–property», де якість розглядають як результат взаємодії сировини, термомеханічної історії потоку та умов «фіксації» структури в зоні охолодження [1–5, 15].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Провідні огляди 2023–2025 рр. (X. Sui, T. Zhang, L. Jiang; X. Zhang, Y. Zhao, X. Zhao та ін.; M. Dinali, R. Liyanage, M. Silva та ін.) визначають високовологісну екструзію як найбільш результативний технологічний підхід до формування анізотропної «м’язоподібної» мікроструктури в м’ясних аналогах на основі рослинних білків, при цьому ключовим чинником стабілізації орієнтованих білкових доменів і керування фазовою сегрегацією вважається охолоджувальна матриця (cooling die), що забезпечує контрольований тепломасообмін і «фіксацію» структури потоку [1–3, 5, 15]. Інженерні аспекти формування структури в cooling die також детально розглянуті S. Gulzar, A. F. Hosseini, O. Martín-Belloso та ін. [15]. Паралельно у 2024–2025 рр. сформувався окремий науковий напрям, присвячений ризикам окиснення білків і ліпідів у процесі екструзії та їх впливу на аромат, колір і харчову якість готових виробів (X. Xu, C. Ma, Y. Yang та ін.; Z. Escobedo-Avellaneda, Á. Colin-Oviedo, G. V. Vuitimea-Cantúa та ін.), що зумовлює необхідність комплексного контролю технологічних режимів [4, 16]. Дослідження морфогенезу структури та реології потоку в умовах НМЕ (P. Wittek, F. Ellwanger, H. P. Karbstein, M. A. Emin; F. Farrokhi, M. H. Azizi) показали, що поєднання зсуву, температури та вологості визначає розвиток мікроструктури й ступінь волокнистості, а молекулярні перетворення білків безпосередньо залежать від інтенсивності термомеханічного навантаження [6, 17]. Окремі роботи продемонстрували специфіку змін пшеничного глютену у високовологісних зсувних процесах та можливості цілеспрямованого керування структурою через білкові композиції й модифікацію білків (N. Gasparre, M. van den Berg, F. Oosterlinck, A. Sein; M. M. Muñoz, M. D. Garrido, I. Peñaranda; X. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang та ін.), зокрема частковий гідроліз або контроль ступеня денатурації [7, 12, 18]. Водночас значний масив

публікацій присвячено сенсорним обмеженням plant-based продуктів, насамперед появі “beany/off-flavors”, а також технологічним стратегіям їх зниження (M. Kurakake, Y. Amai; H. Abdipour, G. Asgari; L. Yang, T. Zhang, H. Li та ін.) [8–10].

Мета статті – систематизувати сучасні дані 2021–2026 рр. щодо сировинних, технологічних і нутритивних аспектів застосування ТРБ у м’ясних аналогах, узагальнити механізми формування волокнистої структури та надати практичні рекомендації з проєктування рецептур і режимів екструзії для отримання продуктів із прогнозованими властивостями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сировинна база для виробництва текстурованих рослинних білків ґрунтується переважно на соєвих і горохових ізолятах або концентратах, пшеничному глютені та білках бобових культур (X. Sui та ін.; X. Zhang та ін.; M. Dinali та ін.; S. Ghosh, M.-J. Kim, S. Sun, C. Jung; C. Barnés-Calle, G. Matas, A. Claret та ін.; V. Bulgaru, I. Sensoy, N. Natreba та ін.; Y. Zhang, B.-J. Gu, N.-K. Hwang, G.-H. Ryu) [1–3, 11–13, 19–20]. Якість текстурування визначається не лише видовим походженням білка, а й його функціональним профілем, зокрема розчинністю, здатністю до гелеутворення й емульгування, вмістом залишкових ліпідів і вуглеводів, а також ступенем попередньої денатурації [1–3, 15]. Важливу роль відіграє спосіб екстракції білка, який впливає на рівень антипоживних факторів (фітатів, інгібіторів протеаз) і, відповідно, на подальшу перетравлюваність та структуроутворення білкових систем; тому сучасні підходи рекомендують починати оптимізацію кінцевої якості з контролю сировини та вибору методів вилучення і фракціонування білка з метою балансу між технологічною придатністю і нутритивною ефективністю (M. L. Manzanilla-Valdez, Z. Ma, M. Mondor, A. J. Hernández-Álvarez) [14, 16]. Узагальнені характеристики основних джерел рослинного білка, їхні технологічні переваги, обмеження та практичні підходи до використання в м’ясних аналогах наведено в табл. 1.

Екструзійне текстурування рослинних білків поділяють на низьковологісну екструзію (LME, приблизно 20–35 % вологи) та високовологісну екструзію (HME/

Таблиця 1 – Джерела рослинних білків та технологічні ролі в м’ясних аналогах

Джерело	Тип інгредієнта	Типові сильні сторони	Типові обмеження	Практичні підходи
Соєа	Ізолят/концентрат	Висока текстурованість; стабільність структури	«Beany» ноти; алергенність	Керування ароматом і окисненням; підбір режимів НМЕ/ЛМЕ; ароматизація [1, 8–10]
Горох	Ізолят/концентрат	Нейтральніший смак; безглютенова опція	Менша еластичність/волокнистість	Суміші з глютенном або іншими білками; оптимізація охолодження в НМЕ [2, 13]
Пшениця (глютен)	Глютен/модифікати	Підсилене анізотропію та еластичність	Низький лізин; дієтичні обмеження	Використовувати як «армувальний» компонент у сумішах; балансувати нутритивність [7, 13]
Бобові суміші (фаба, нут тощо)	Концентрати/суміші	Гнучкість рецептур; локальна сировина	Варіабельність; ароматичні ризики	Стандартизація партій; керування ароматом; RSM-оптимізація режимів [11, 19–20]

Джерело: сформовано авторами на основі висвітленого огляду

HMMA, приблизно 50–80 % вологи), що детально розглянуто у працях X. Sui та ін.; X. Zhang та ін.; M. Dinali та ін.; C. M. Santos та ін.; S. Gulzar та ін.; F. Farrokhi, M. H. Azizi [1–3, 5, 15, 17]. Умови LME забезпечують формування пористих текстурованих білкових гранул (TVP), які після регідратації найбільш придатні для фаршевих систем, тоді як HME дозволяє отримувати суцільні волокнисті структури з вираженою анізотропією, характерні для «шматкових» м'ясних аналогів, таких як філе або стейки [1–3, 5, 15, 17]. Критичною особливістю HME є застосування охолоджувальної матриці, що визначає відтворюваність волокнистої структури та стабільність текстури під час зберігання і подальшої термічної обробки продукту, що підкреслено С. М. Santos та ін. і S. Gulzar та ін. [5, 15]. Порівняльні характеристики низько- та високовологісної екструзії, а також пов'язані з ними технологічні переваги й ризики наведено в табл. 2.

Формування анізотропної волокнистої структури в умовах HME пояснюють послідовністю взаємопов'язаних процесів, що включають денатурацію і часткове розгортання білкових молекул у нагрітій зоні, орієнтацію білкових агрегатів під дією зсуву, фазове розшарування білково-водних або білково-полісахаридних систем та стабілізацію сформованої морфології під час охолодження в матриці, що детально описано у працях X. Sui, T. Zhang, X. Zhang, L. Jiang; Y. Zhao, X. Zhao та ін.; M. Dinali, R. Liyanage, M. Silva та ін.; C. M. Santos, A. Santiago, A. R. L. Araújo та ін.; P. Wittek, F. Ellwanger, H. P. Karbstein, M. A. Emin; S. Gulzar, A. F. Hosseini, O. Martín-Belloso та ін.; F. Farrokhi, M. H. Azizi [1–3, 5–6, 15, 17]. Показано, що білкові композиції можуть істотно підсилювати або послаблювати анізотропію структури: зокрема, додавання пшеничного глютену до горохових або бобових білків підвищує еластичність і волокнистість, однак потребує нутрітивного балансування через дефіцит лізину та врахування дієтичних обмежень, що підтверджено дослідженнями N. Gasparre, M. van den Berg, F. Oosterlinck, A. Sein; C. Barnés-Calle, G. Matas, A. Claret та ін.; X. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang та ін. [7, 13, 18]. Модифікація білків, включно з частковим гідролізом і контролем ступеня денатурації, впливає на реологічні властивості розплаву та створює можливості керування мікроструктурою продукту, що відображено у роботах M. M. Muñoz, M. D. Garrido, I. Peñaranda та X. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang та ін. [12, 18].

З нутрітивної точки зору текстуровані рослинні білки здатні забезпечувати високий вміст білка та підвищену частку харчових волокон у готових м'ясних аналогах, що формує їхню функціональну спрямованість, що узагальнено в оглядах X. Sui, T. Zhang, X. Zhang, L. Jiang; M. Dinali, R. Liyanage, M. Silva та ін.; S. Gulzar, A. F. Hosseini, O. Martín-Belloso та ін. [1–3, 15]. Водночас біологічна цінність визначається амінокислотним складом і поєднанням джерел білка: соя характеризується більш повним амінокислотним профілем, тоді як гороховий і пшеничний білки потребують комплементарного змішування для досягнення оптимального балансу незамінних амінокислот, що підтверджено в роботах X. Sui та ін.; X. Zhang та ін.; S. Gulzar та ін. [1–3, 15]. Екструзія часто підвищує перетравлюваність білка завдяки інактивації антипоживних факторів, однак інтенсивні режими з високими температурами, низькою вологістю та значними питомими механічними енерговитратами можуть посилювати реакції Майяра, знижуючи доступність амінокислот, а також сприяти агрегації білків, що показано Z. Escobedo-Avellaneda, Á. Colin-Oviedo, G. V. Buitimea-Cantúa та ін. [16]. Додатково процеси окиснення ліпідів і білків під час екструзії та зберігання впливають на смак, аромат і колір продуктів, що зумовлює необхідність пошуку компромісу між текстурою, нутрітивною якістю та сенсорними характеристиками, що відображено в дослідженнях X. Xu, C. Ma, Y. Yang та ін.; Z. Escobedo-Avellaneda та ін. [4, 16]. Залежність волокнистості структури від вологовмісту в екструзійному процесі представлено на рис. 1.

Одним із ключових бар'єрів для споживчої прийнятності м'ясних аналогів залишається наявність «beany» та інших небажаних ароматичних нот, пов'язаних з ліпоксигеназними шляхами та продуктами окиснення, а також з термогенерованими сполуками, які утворюються під час екструзії, та досліджено M. Kurakake, Y. Amai; H. Abdipour, G. Asgari; L. Yang, T. Zhang, H. Li та ін. [8–10]. Сучасні дослідження показують, що сенсорний профіль формується на перетині вибору й підготовки сировини, керування параметрами екструзії та післяпроцесних рішень, таких як ароматичні композиції, матриці-носії або ферментаційні підходи, що відображено у роботах X. Xu та ін.; L. Yang та ін. [4, 8–10]. Порівняння ключових споживчих властивостей продуктів, отриманих методами LME та HME, наведено на рис. 2, тоді як узагальнені внески сировинних,

Таблиця 2 – Порівняння низько- та високовологісної екструзії для м'ясних аналогів

Критерій	LME (TVP)	HME (HMMA)	Коментар
Вологість, %	≈20–35	≈50–80	Вологість визначає фазову поведінку та потенціал волокнистості [1–3]
Типова структура	Пориста/губчаста	Волокниста/анізотропна	Для HME вирішальна роль cooling die [5]
Цільові продукти	Фаршеві аналоги	Шматкові аналоги	HME ближче до м'язової тканини [1–3]
Ризики якості	Майяр/надмірна агрегація	Окиснення/перегрів	Потрібен контроль Т–вологи–SME та кисню/ліпідів [4, 16]

Джерело: сформовано авторами на основі висвітленого огляду

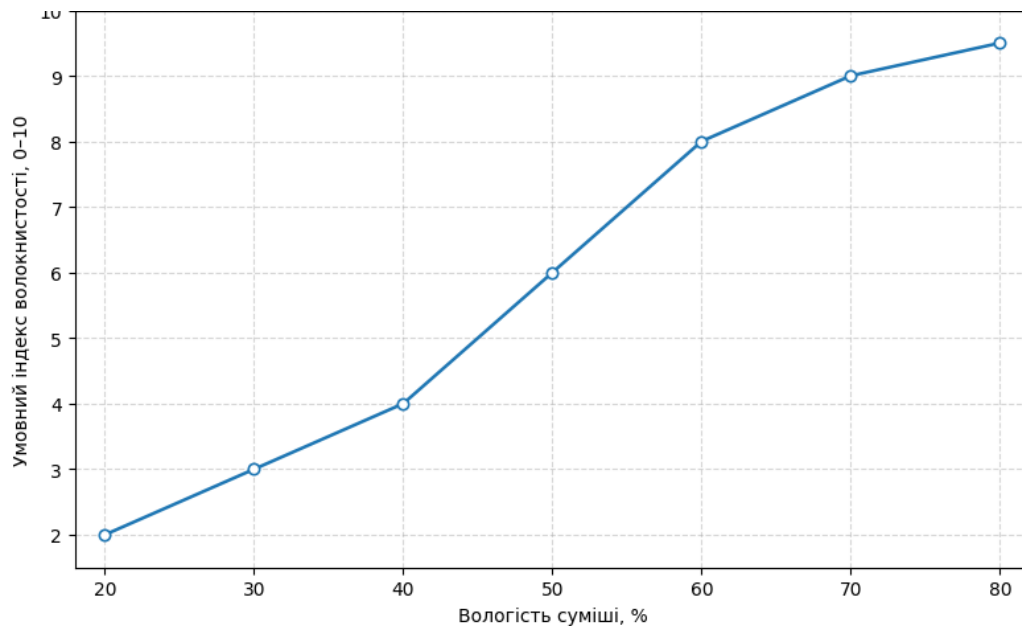


Рисунок 1 – Зв’язок вологовмісту з волокнистістю структури під час екструзійного структурування

Джерело: сформовано авторами на основі висвітленого огляду

процесних і рецептурних чинників у формування якості м’ясних аналогів подано на рис. 3.

Висновки. Дані 2021–2026 рр. підтверджують, що одержання м’ясних аналогів із прогнозованими структурно-механічними, нутривними та сенсорними характеристиками можливе лише за інтегрованого проєктування «сировина–рецептура–процес», у межах якого вихідною точкою є контроль функціонального профілю білкових інгредієнтів (розчинність, гелеутворення, емульгування, ступінь денатурації, залишкові

ліпіди/вуглеводи) та наслідків екстракції для антипоживних факторів і подальшої перетравлюваності.

На рівні рецептури практично обґрунтованим є комбінування джерел білка для одночасної корекції амінокислотного складу та формування волокнистості (зокрема використання глютену як «структурного армувального» компонента в сумішах із гороховими/бобовими білками за умови нутривного балансування), а також проєктування жирової й водної фаз із залученням гідроколідів/структуруювачів для

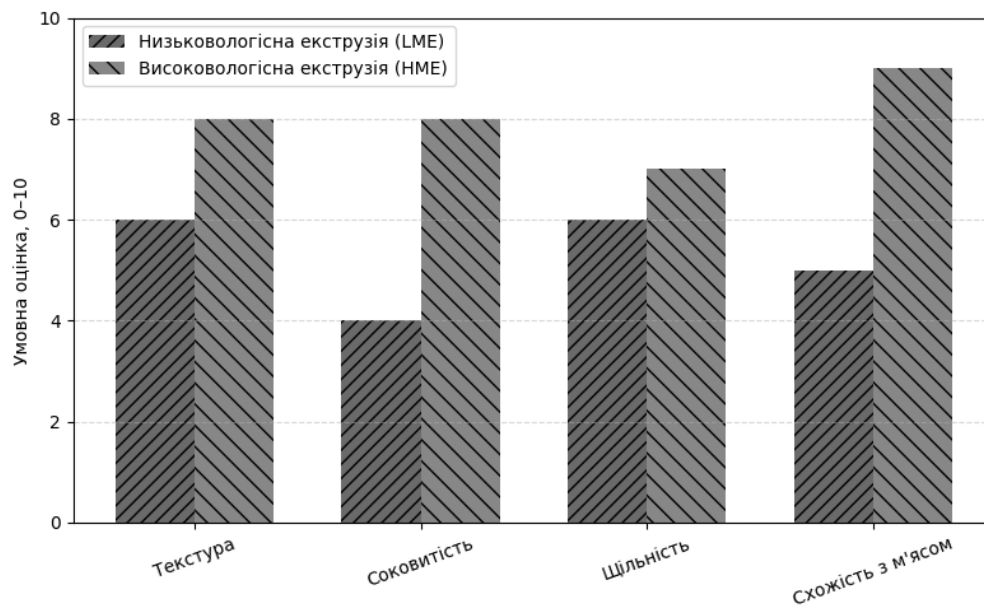


Рисунок 2 – Порівняння ключових споживчих властивостей продуктів LME та HME

Джерело: сформовано авторами на основі висвітленого огляду

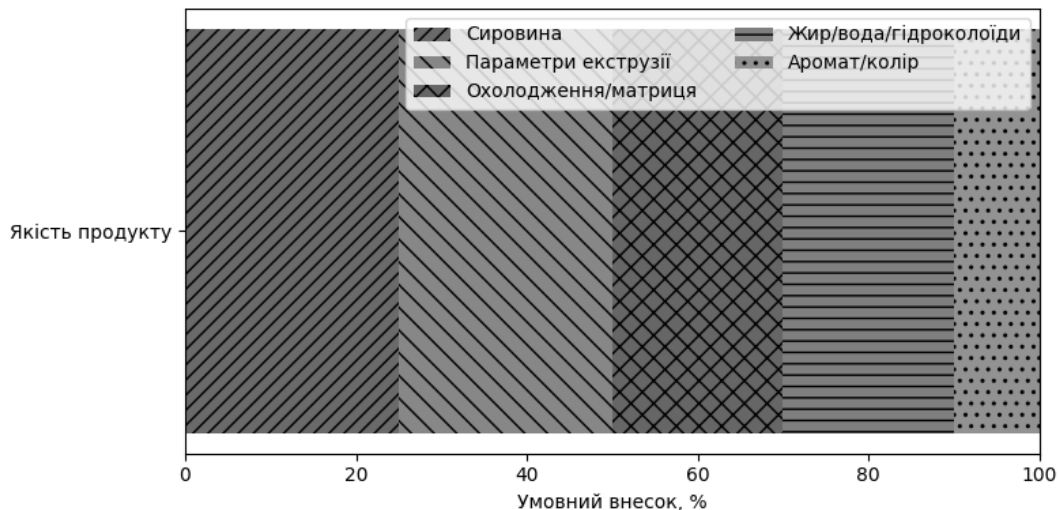


Рисунок 3 – Часткові внески чинників у формування якості м'ясних аналогів

Джерело: сформовано авторами на основі висвітленого огляду

підвищення соковитості, стабільності та утримання вологи і жиру.

Вибір типу процесу слід здійснювати відповідно до цільового формату продукту: LME/TVP є доцільним для фаршевих систем з подальшою регідрацією, тоді як НМЕ/НММА є найбільш перспективною для «шматкових» виробів, оскільки забезпечує анізотропну волокнисту структуру, близьку до м'язової тканини. Для НМЕ ключовою умовою відтворюваності є керування термомеханічним навантаженням (вологість–температура–зсув/швидкість шнека–SME–час перебування) у поєднанні з контрольованим охолодженням у cooling die, яке «фіксує» орієнтацію доменів і результати фазового розшарування, визначаючи текстуру та стабільність продукту.

Оптимізацію режимів необхідно проводити з урахуванням компромісу між структурою і нутритивною якістю: екструзія здатна підвищувати засвоюваність і зменшувати вплив антипоживних факторів, однак

надмірні режими (особливо за низької вологості та високих SME) підвищують ризики реакції Майяра з втратою доступного лізину та сприяють небажаній агрегації білків.

Паралельно слід інтегрувати сенсорний дизайн і керування ароматом у технологічний процес через вибір сировини та деактивацію ферментів, контроль окиснення ліпідів і білків, мінімізацію контактів з киснем, добір параметрів екструзії, а також застосування ароматичних систем/матриць-носіїв для зменшення “beany/off-flavors” і підвищення споживчої прийнятності.

З огляду на варіабельність альтернативної рослинної сировини, практично доцільним є використання підходів структурно-процесного моделювання та статистичної оптимізації (зокрема RSM) для підбору рецептур і режимів під конкретні білкові суміші та забезпечення стабільної якості в промислових умовах.

Список використаних джерел:

1. Sui X., Zhang T., Zhang X., Jiang L. High-Moisture Extrusion of Plant Proteins: Fundamentals of Texturization and Applications. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2024. Vol. 15, № 1. P. 125–149. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034346>
2. Zhang X., Zhao Y., Zhao X., Sun P., Zhao D., Jiang L., Sui X. The texture of plant protein-based meat analogs by high moisture extrusion: A review. *Journal of Texture Studies*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jtxs.12697>
3. Dinali M., Liyanage R., Silva M., Newman L., Ahikari B., Wijesekara I., Chandrapala J. Fibrous Structure in Plant-Based Meat: High-Moisture Extrusion Factors and Sensory Attributes in Production and Storage. *Food Reviews International*. 2024. P. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2309593>
4. Xu X., Ma C., Yang Y., Bian X., Wang B., Zhang G., Zhang N. Effects of phytic acid from soybean meal on Maillard reaction and antioxidant properties of products. *Food Chemistry*. 2024. Art. 141257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141257>
5. Santos C. M., Santiago A., Araújo A. R. L., Pinto S., Agostinho R. R., Simão S., Azevedo T., Antunes C., Faustino M. A. F., Araújo I., Neves M. G. P. M. S., Martinho J. M. G., Maçôas E. M. S. New fluorescent probes based on gallium(III) corrole complexes for the recognition of hydrogen sulfide: A journey from solution to intracellular site. *Dyes and Pigments*. 2023. Art. 111304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111304>
6. Wittek P., Ellwanger F., Karbstein H. P., Emin M. A. Morphology Development and Flow Characteristics during High Moisture Extrusion of a Plant-Based Meat Analogue. *Foods*. 2021. Vol. 10, № 8. P. 1753. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10081753>

7. Gasparre N., van den Berg M., Oosterlinck F., Sein A. High-Moisture Shear Processes: Molecular Changes of Wheat Gluten and Potential Plant-Based Proteins for Its Replacement. *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 18. P. 5855. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27185855>
8. Kurakake M., Amai Y. Characterization of a β -N-acetylhexosaminidase with transglycosylation activity from *Metarhizium* sp. A34. *Journal of Food Science*. 2022. Vol. 87, № 4. P. 1466–1474. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16113>
9. Abdipour H., Asgari G. Enhanced methylene blue degradation and mineralization through activated persulfate coupled with magnetic field. *Cleaner Engineering and Technology*. 2024. Art. 100822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100822>
10. Yang L., Zhang T., Li H., Chen T., Liu X. Control of Beany Flavor from Soybean Protein Raw Material in Plant-Based Meat Analog Processing. *Foods*. 2023. Vol. 12, № 5. P. 923. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12050923>
11. Ghosh S., Kim M.-J., Sun S., Jung C. Amino Acid Profile and Mineral Content of Cultivated Snails *Acusta despecta* and *Achatina fulica*: Assessing Their Potential as Nutritional Source. *Foods*. 2025. Vol. 14, № 1. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14010123>
12. Muñoz M. M., Garrido M. D., Peñaranda I. Effects of Extrusion on Protein Textures of Hydrolysed Rice and Pea Isolates. *Foods*. 2025. Vol. 14, № 21. P. 3590. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14213590>
13. Barnés-Calle C., Matas G., Claret A., Guerrero L., Fulladosa E., Gou P. High moisture extrusion of pea protein isolate to mimic chicken texture: instrumental and sensory insights. *Food Hydrocolloids*. 2024. Art. 110129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110129>
14. Manzanilla-Valdez M. L., Ma Z., Mondor M., Hernández-Álvarez A. J. Decoding the Duality of Antinutrients: Assessing the Impact of Protein Extraction Methods on Plant-Based Protein Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00380>
15. Gulzar S., Hosseini A. F., Martín-Belloso O., Soliva-Fortuny R., Rizvi S. S. H. Engineering Processes for Plant-Based Meat Analogs: Current Status and Future Outlook. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. Vol. 24, № 6. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70322>
16. Escobedo-Avellaneda Z., Colin-Oviedo Á., Buitimea-Cantúa G. V., Pérez-Carillo E., Chuck-Hernández C., Espinosa-Ramírez J., Castagnini J. M., Welti-Chanes J. Extrusion effects on composition, protein digestibility, and functional properties of cold-pressed oilseed cakes. *CyTA – Journal of Food*. 2025. Vol. 23, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2549373>
17. Farrokhi F., Azizi M. H. Comparative Study of Physicochemical and Structural Characteristics of Meat Analogues Produced From Soy and Wheat Proteins. *Food Science & Nutrition*. 2025. Vol. 13, № 8. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.70780>
18. Zhang X., Zhao Y., Zhang T., Zhang Y., Jiang L., Sui X. Potential of hydrolyzed wheat protein in soy-based meat analogues: Rheological, textural and functional properties. *Food Chemistry: X*. 2023. Vol. 20. Art. 100921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100921>
19. Bulgaru V., Sensoy I., Netreba N., Gurev A., Altanlar U., Paiu S., Dragancea V., Sturza R., Ghendov-Mosanu A. Qualitative and Antioxidant Evaluation of High-Moisture Plant-Based Meat Analogs Obtained by Extrusion. *Foods*. 2025. Vol. 14, № 17. P. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14172939>
20. Zhang Y., Gu B.-J., Hwang N.-K., Ryu G.-H. Optimization of High-Moisture Meat Analog Production with the Addition of Isolated Mung Bean Protein Using Response Surface Methodology. *Foods*. 2025. Vol. 14, № 8. P. 1323. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14081323>

References:

1. Sui, X., Zhang, T., Zhang, X., Jiang, L. (2024). High-Moisture Extrusion of Plant Proteins: Fundamentals of Texturization and Applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 125–149. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034346>
2. Zhang, X., Zhao, Y., Zhao, X., Sun, P., Zhao, D., Jiang, L., Sui, X. (2022). The texture of plant protein-based meat analogs by high moisture extrusion: A review. *Journal of Texture Studies*. DOI: <https://doi.org/10.1111/jtxs.12697>
3. Dinali, M., Liyanage, R., Silva, M., Newman, L., Ahikari, B., Wijesekara, I., Chandrapala, J. (2024). Fibrous Structure in Plant-Based Meat: High-Moisture Extrusion Factors and Sensory Attributes in Production and Storage. *Food Reviews International*, pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2309593>
4. Xu, X., Ma, C., Yang, Y., Bian, X., Wang, B., Zhang, G., Zhang, N. (2024). Effects of phytic acid from soybean meal on Maillard reaction and antioxidant properties of products. *Food Chemistry*, art. 141257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141257>
5. Santos, C. M., Santiago, A., Araújo, A. R. L., Pinto, S., Agostinho, R. R., Simão, S., Azevedo, T., Antunes, C., Faustino, M. A. F., Araújo, I., Neves, M. G. P. M. S., Martinho, J. M. G., Maçôas, E. M. S. (2023). New fluorescent probes based on gallium(III) corrole complexes for the recognition of hydrogen sulfide: A journey from solution to intracellular site. *Dyes and Pigments*, art. 111304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2023.111304>
6. Wittek, P., Ellwanger, F., Karbstein, H. P., Emin, M. A. (2021). Morphology Development and Flow Characteristics during High Moisture Extrusion of a Plant-Based Meat Analogue. *Foods*, vol. 10, no. 8, pp. 1753. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10081753>
7. Gasparre, N., van den Berg, M., Oosterlinck, F., Sein, A. (2022). High-Moisture Shear Processes: Molecular Changes of Wheat Gluten and Potential Plant-Based Proteins for Its Replacement. *Molecules*, vol. 27, no. 18, pp. 5855. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27185855>

8. Kurakake, M., Amai, Y. (2022). Characterization of a β -N-acetylhexosaminidase with transglycosylation activity from *Metarhizium* sp. A34. *Journal of Food Science*, vol. 87, no. 4, pp. 1466–1474. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16113>
9. Abdipour, H., Asgari, G. (2024). Enhanced methylene blue degradation and mineralization through activated persulfate coupled with magnetic field. *Cleaner Engineering and Technology*, art. 100822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100822>
10. Yang, L., Zhang, T., Li, H., Chen, T., Liu, X. (2023). Control of Beany Flavor from Soybean Protein Raw Material in Plant-Based Meat Analog Processing. *Foods*, vol. 12, no. 5, pp. 923. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12050923>
11. Ghosh, S., Kim, M.-J., Sun, S., Jung, C. (2025). Amino Acid Profile and Mineral Content of Cultivated Snails *Acusta despecta* and *Achatina fulica*: Assessing Their Potential as Nutritional Source. *Foods*, vol. 14, no. 1, pp. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14010123>
12. Muñoz, M. M., Garrido, M. D., Peñaranda, I. (2025). Effects of Extrusion on Protein Textures of Hydrolysed Rice and Pea Isolates. *Foods*, vol. 14, no. 21, pp. 3590. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14213590>
13. Barnés-Calle, C., Matas, G., Claret, A., Guerrero, L., Fulladosa, E., Gou, P. (2024). High moisture extrusion of pea protein isolate to mimic chicken texture: instrumental and sensory insights. *Food Hydrocolloids*, art. 110129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110129>
14. Manzanilla-Valdez, M. L., Ma, Z., Mondor, M., Hernández-Álvarez, A. J. (2024). Decoding the Duality of Antinutrients: Assessing the Impact of Protein Extraction Methods on Plant-Based Protein Sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00380>
15. Gulzar, S., Hosseini, A. F., Martín-Belloso, O., Soliva-Fortuny, R., Rizvi, S. S. H. (2025). Engineering Processes for Plant-Based Meat Analogs: Current Status and Future Outlook. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 24, no. 6. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70322>
16. Escobedo-Avellaneda, Z., Colin-Oviedo, Á., Buitimea-Cantúa, G. V., Pérez-Carillo, E., Chuck-Hernández, C., Espinosa-Ramírez, J., Castagnini, J. M., Welti-Chanes, J. (2025). Extrusion effects on composition, protein digestibility, and functional properties of cold-pressed oilseed cakes. *CyTA – Journal of Food*, vol. 23, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2025.2549373>
17. Farrokhi, F., Azizi, M. H. (2025). Comparative Study of Physicochemical and Structural Characteristics of Meat Analogues Produced From Soy and Wheat Proteins. *Food Science & Nutrition*, vol. 13, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.70780>
18. Zhang, X., Zhao, Y., Zhang, T., Zhang, Y., Jiang, L., Sui, X. (2023). Potential of hydrolyzed wheat protein in soy-based meat analogues: Rheological, textural and functional properties. *Food Chemistry: X*, vol. 20, art. 100921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100921>
19. Bulgaru, V., Sensoy, I., Netreba, N., Gurev, A., Altanlar, U., Paiu, S., Dragancea, V., Sturza, R., Ghendov-Mosanu, A. (2025). Qualitative and Antioxidant Evaluation of High-Moisture Plant-Based Meat Analogs Obtained by Extrusion. *Foods*, vol. 14, no. 17, pp. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14172939>
20. Zhang, Y., Gu, B.-J., Hwang, N.-K., Ryu, G.-H. (2025). Optimization of High-Moisture Meat Analog Production with the Addition of Isolated Mung Bean Protein Using Response Surface Methodology. *Foods*, vol. 14, no. 8, pp. 1323. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14081323>

Oleksii Kotov

Oles Honchar Dnipro National University

Serhii Khrychov

University of Customs and Finance

Ruslan Slobodniuk

Dnipro Technological and Economic Vocational College

Andrii Goralchuk

Research technician, Toronto Metropolitan University, Canada

MODERN APPROACHES TO STRUCTURING VEGETABLE PROTEINS IN MEAT ANALOGUE TECHNOLOGIES

This review provides a comprehensive synthesis of scientific research published in 2021–2026 on textured plant proteins applied in meat analogue production, highlighting technological, structural, nutritional, and sensory dimensions of product development. The paper systematizes current knowledge on major protein sources, including soy, pea, wheat gluten, and various pulse-based blends, emphasizing their compositional features, amino acid profiles, functional properties, and suitability for structuring applications. Particular attention is given to the influence of raw material preparation and extraction methods on techno-functional behavior; protein solubility, water- and oil-holding capacity, gelation, and the reduction or persistence of antinutritional factors that may affect digestibility and consumer acceptance. Extrusion technology is analyzed as the principal structuring route, with a detailed comparison of low-moisture and high-moisture extrusion processes. The review explains the physicochemical mechanisms underlying fibrous anisotropic structure formation, including protein denaturation and unfolding, macromolecular alignment under shear and elongational flow, phase separation phenomena, intermolecular crosslinking, and structural stabilization in the cooling die. These transformations are examined in relation to critical process variables such as moisture content, barrel temperature profile, screw configuration and

speed, shear intensity, specific mechanical energy input, and cooling conditions. Their combined impact on texture development, fiber formation, mechanical strength, juiciness, chewiness, and overall sensory perception is discussed. The nutritional dimension addresses protein quality, digestibility, bioavailability of essential amino acids, and the potential losses associated with Maillard reactions during thermal processing. Oxidative changes affecting lipids and proteins, as well as their implications for flavor stability and shelf life, are also reviewed. Furthermore, advanced strategies for controlling undesirable off-notes typical of plant proteins are outlined, including ingredient optimization, enzymatic treatment, fermentation approaches, and targeted process adjustments. By integrating structural science, process engineering, and nutritional evaluation, the review proposes practical formulation and processing guidelines aimed at predictable quality design, improved product consistency, and enhanced consumer acceptance of next-generation plant-based meat analogues.

Keywords: *textured plant proteins; meat analogues; high-moisture extrusion; low-moisture extrusion; digestibility; flavor; techno-functional properties.*

Дата надходження статті: 28.01.2026

Дата прийняття статті: 16.02.2026

Дата публікації статті: 25.06.2026