

ЧЕБАНЕНКО ЄВГЕНІЯ

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0005-3867-4187>e-mail: evgeniachebanenko@gmail.com**МЕЛЬНИК ОКСАНА**

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9201-7955>e-mail: oksana.melnyk@snau.edu.ua

МЕТОД ЕКСТРУЗІЙНОЇ ОБРОБКИ БОБОВИХ: ВПЛИВ НА ПОЖИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

Екструзійна обробка бобових культур є провідною технологією в харчовій промисловості, що покращує їхні поживні, функціональні та споживчі властивості. Огляд систематизує сучасні наукові дані про вплив екструзії на фізико-хімічні, структурно-механічні характеристики бобових і перспективи створення інноваційних продуктів. Метою є аналіз впливу параметрів екструзії (температури, вологості, швидкості шнеку) на білки, вуглеводи, біодоступність нутрієнтів та склад біоактивних сполук. Робота базується на рецензованій літературі з баз Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar за ключовими словами: екструзія бобових, переробка бобових, функціональні властивості.

Екструзія сприяє денатурації білків, покращуючи розчинність і текстуру, що відіграє важливе значення для виробництва аналогів м'яса, та знижує антиживильні фактори (інгібітори трипсину, фітати), підвищуючи засвоюваність білку. Щодо вуглеводів, екструзійна обробка сприяє модифікації крохмалю, впливаючи на вміст резистентного крохмалю залежно від умов, і зменшує кількість олігосахаридів (рафіноза, стахіоза), покращуючи переносимість та засвоєння. Вплив на біоактивні сполуки неоднозначний: високі температури знижують кількість термолабільних вітамінів (B1, B2), але підвищують доступність антиоксидантів. Оптимізація умов екструзійного оброблення мінімізує втрати та покращує органолептику.

Екструдовані бобові застосовуються в безглютенових виробках, снеках, збагачених продуктах; комбінація даного виду оброблення з ферментацією розширює функціональність отриманих систем. Технологія перспективна для створення екологічних альтернатив м'ясу, але потребує подальших досліджень з оптимізації параметрів і оцінки впливу на здоров'я.

Ключові слова: бобові, обробка, поживна цінність, біодоступність, екструзія, функціональні властивості, органолептичні властивості.

СHEBANENKO YEVHENIIA**MELNYK OKSANA**

Sumy National Agrarian University

THE EXTRUSION METHOD FOR LEGUME PROCESSING: INFLUENCE ON NUTRITIONAL PROPERTIES AND POTENTIAL APPLICATIONS

Extrusion processing of pulses is a leading technology in the food industry, enhancing their nutritional, functional, and consumer properties. This review systematizes current scientific data on the effects of extrusion on the physicochemical and structural-mechanical properties of pulses and prospects for innovative product development. The study aims to analyze the impact of extrusion parameters (temperature, moisture, screw speed) on proteins, carbohydrates, nutrient bioavailability, and bioactive compounds. It is based on peer-reviewed literature from Scopus, Web of Science, PubMed, and Google Scholar, using keywords: pulse extrusion, legume processing, functional properties.

Extrusion promotes protein denaturation, improving solubility and texture, crucial for meat analogues, and reduces anti-nutritional factors (trypsin inhibitors, phytates), enhancing nutrient absorption. For carbohydrates, it modifies starch, affecting resistant starch content depending on conditions, and reduces oligosaccharides (raffinose, stachyose), improving tolerability. The impact on bioactive compounds varies: high temperatures decrease thermolabile vitamins (B1, B2), while cell wall breakdown increases antioxidant availability. Optimized conditions minimize losses and enhance organoleptic properties.

Extruded pulses are utilized in gluten-free products, snacks, and fortified foods; combining extrusion with fermentation boosts functionality. The technology shows promise for sustainable meat alternatives, yet further research is needed to optimize parameters and assess health impacts. Extrusion has a positive effect on the protein fraction of legumes, promoting protein denaturation and the formation of a stable structure, which makes this method particularly promising for the production of alternative meat products.

Keywords: legumes, processing, nutritional value, bioavailability, extrusion, functional properties, organoleptic properties.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 30.04.2025

Вступ

Бобові культури є важливим джерелом білка, харчових волокон, вітамінів і мінералів, що робить їх цінним компонентом раціону харчування. Однак їхнє широке використання в харчовій промисловості обмежується наявністю антиживильних факторів, низькою засвоюваністю окремих нутрієнтів і специфічними органолептичними характеристиками. Екструзійна обробка, як сучасна технологія, відкриває нові можливості для подолання цих обмежень, дозволяючи не лише покращити поживну цінність бобових, а й розширити асортимент продуктів на їхній основі. Цей метод поєднує вплив високої температури, тиску та механічного зсуву, що сприяє модифікації структури

макромолекул, підвищенню біодоступності поживних речовин і створенню продуктів із покращеними функціональними властивостями.

Актуальність дослідження екструзії бобових зумовлена зростаючим попитом на високобілкові, безглютенові та функціональні продукти, а також потребою в екологічно стійких альтернативах традиційним джерелам білка, таким як м'ясо. Останні наукові розробки свідчать про значний потенціал цієї технології у створенні м'ясних аналогів, збагачених снєків і дієтичних продуктів із низьким глікемічним індексом. Водночас потребують уточнення оптимальні параметри процесу (температура, вологість) для збереження термолабільних вітамінів і максимізації біодоступності поживних речовин, що потребує системного аналізу сучасних досягнень у цій галузі.

Метою даного огляду є узагальнення та аналіз сучасних наукових даних про екструзійну обробку бобових культур, з акцентом на її вплив на фізико-хімічні, структурно-механічні та споживчі властивості кінцевих продуктів. У роботі розглянуто ключові аспекти технології, зокрема вплив умов екструзії на білкові та вуглеводні компоненти, біодоступність нутрієнтів і перспективи створення інноваційних харчових продуктів. Огляд базується на актуальних літературних джерелах і спрямований на виявлення прогалин у знаннях та визначення напрямів подальших досліджень.

Огляд останніх досліджень і публікацій

Екструзія сьогодні постає як потужний метод переробки бобових, який дозволяє покращити їх споживчі властивості, збільшити харчову цінність та модифікувати функціональні характеристики. Цей процес передбачає поєднання високої температури, тиску та механічного впливу, що зумовлює зміни у макромолекулах та формування продуктів з новими текстурними і поживними властивостями. Сучасні дослідження зосереджуються на різноманітних аспектах застосування цієї технології, включаючи оптимізацію виробничих параметрів, збільшення біодоступності поживних речовин, розробку екологічно дружніх продуктів, а також створення інноваційних харчових виробів на основі бобових культур.

Одним з важливих аспектів є заміна зернових культур бобовими у виробництві екструдованих продуктів, що дає можливість збільшити кількість протеїну та харчових волокон, одночасно знижуючи відсоток крохмалю, що позитивно позначається на поживності кінцевого продукту [1, 2]. Наприклад, Tas та Shah (2021) відмічають, що заміна злаків бобовими (горох, сочевиця, нут) в екструдованих снєках сприяє збільшенню вмісту білку на 20-30%, залежно від типу бобових, досягаючи показника 25-28 г/100 г, а вміст клітковини збільшується до 15 г/100 г проти 5-7 г/100 г у зернових аналогах [1]. Pasqualone et al. (2020) доповнюють, що така комбінація дає змогу знизити глікемічний індекс виробів на 15-20%, роблячи їх привабливими для дієтичного споживання [2]. Крім того, поєднання бобових з іншими рослинними компонентами, такими як рис або кукурудза, поліпшує антиоксидантні властивості та біодоступність корисних елементів. Rico et al. (2021) встановили, що екструзія бобово-злакових сумішей (скажімо, нуту з рисом у співвідношенні 60:40 підвищує антиоксидантну активність на 25% в порівнянні з необробленими сумішами завдяки вивільненню фенольних сполук, таких як ферулова кислота, кількість якої збільшується з 50 до 70 мг/100 г [3]. Ці зміни також сприяють покращенню смаку, підвищуючи оцінку сенсорних профілів на 10-15% [3].

Дослідження обробки білкових компонентів бобових за допомогою екструзії виявляють суттєві зміни структури, які впливають на властивості кінцевих продуктів: їхню текстуру, здатність до засвоєння та функціональність. Екструзія при високій вологості сировини від 40 до 60% є особливо перспективною для створення білкових замінників, зокрема аналогів м'яса [4, 11]. Zang et al. (2024) повідомляють, що високо-вологісна екструзія горохового білка за температури 140°C та вологості 50% забезпечує волокнисту структуру, міцність на розрив якої досягає 2,5 МПа. Це наближає її до характеристик курячого м'яса 2,8-3,0 МПа, а коефіцієнт засвоюваності *in vitro* становить 88% [4]. Andersone-Trezina та Kince (2022) додають, що екструдати з гороху та квасолі, оброблені за вологості 55% та швидкості шнека 350 об/хв, демонструють силу зрушення 2,7-2,9 МПа, що дозволяє імітувати текстуру яловичини або свинини. Додавання 5% соєвого ізоляту сприяє підвищенню цього показника до 3,1 МПа [11]. Cargo-Froom et al. (2022) встановили, що екструзія канадських бобових (сочевиця, горох) при температурі 130-140°C збільшує засвоюваність білка на 15-20%, досягаючи значення 85-90%. Водночас, вміст лізину може знижуватись на 5-10% при температурах вище 150°C внаслідок реакцій Майяра. Оптимізація температурного режиму до 120°C дозволяє зменшити втрати лізину до 2-3% [13]. Fernando (2021) підкреслює, що екструзія також сприяє покращенню водоутримувальної здатності білків на 25-30%, що є корисним для створення соковитих текстур у м'ясних аналогах [10]. Duque-Estrada et al. (2023) продемонстрували, що комбінування бобових з пшеничним глютенем у пропорції 70:30 під час екструзії збільшує вміст незамінних амінокислот на 15%, зберігаючи до 95% їхньої початкової кількості [14].

Екструзія значно впливає і на вуглеводневий профіль бобових, зокрема, на рівень резистентного крохмалю та олігосахаридів, який залежить від параметрів обробки. Дослідження Ciudad-Mulero et al. (2022) продемонструвало, що при температурі 130°C та вологості 25% вміст резистентного крохмалю в нутто-рисових сумішах збільшується з 2,5% до 4,8%, що позитивно впливає на пребіотичні властивості та підвищує виробництво коротко ланцюгових жирних кислот у

кишечнику на 20-25% [5]. Водночас Pedrosa et al. (2021) вказують, що за вищих температур 160-180°C рівень резистентного крохмалю падає на 10-15% через гідроліз до простих цукрів, що потенційно може підняти глікемічний індекс на 10% [7]. Екструзія також ефективно зменшує кількість олігосахаридів (рафінози, стахіози), котрі спричиняють дискомфортні відчуття у травній системі, на 60-80% при температурах 140-150°C, що зі слів споживачів, покращує переносимість продуктів на 70% [8]. Cotacallapa-Sucarusa et al. (2021) додають, що поєднання екструзії з попередньою ферментацією (24 години) дозволяє знизити кількість олігосахаридів на 90%, а вміст розчинних волокон збільшити на 12-15%, досягаючи 10 г/100 г [8]. Gu et al. (2022) зазначають, що ці зміни зменшують глікемічний індекс екструдатів на 15-20%, роблячи їх придатними для раціону людей з діабетом [18]. Pasqualone et al. (2020) підкреслюють, що екструзія бобових у поєднанні з рисом збільшує загальний вміст клітковини на 8-10%, що покращує структуру безглютенової пасти та хліба [2].

Важливим аспектом є вплив екструзії на біологічно активні речовини у бобових культурах, зокрема поліфеноли, антиоксиданти та вітаміни. Pedrosa et al. (2021) встановили, що екструзія сочевиці за температури 140°C та вологості 30% призводить до збільшення вмісту доступних поліфенолів на 30-40% порівняно з автоклавуванням, сягаючи показника 120-150 мг/100 г. Це пояснюється руйнуванням клітинних стінок та вивільненням сполук, які були зв'язані [7]. Cotacallapa-Sucarusa et al. (2021) свідчать про зростання антиоксидантної активності екструдованих бобових на 20-35%. Зокрема, для нуту це збільшення досягає 40% за температури 130°C, що пов'язують зі збільшенням вмісту катехінів на 25% [8]. Rico et al. (2021) підкреслюють, що екструзія сумішей бобових та зернових збільшує біодоступність фенольних сполук на 28%, що позитивно впливає на антиоксидантний потенціал продуктів без глютену [3]. Проте, високі температури можуть мати негативний вплив на термочутливі вітаміни. Siitonen et al. (2024) визначили, що при високо вологій екструзії за температури 150°C та вологості 50% втрати вітамінів B1 і B2 складають від 25 до 40%. Конкретно, для B1 втрати становлять 35%, а для B2 – 28%. Водночас, зменшення температури до 120°C дозволяє скоротити втрати до 10-15%, зберігши до 85-90% від початкової кількості [16]. Tas та Shah (2021) додають, що при температурі 160°C втрати вітаміну С у бобових снеках можуть сягати 30-40%, а при температурі 130°C цей показник знижується до 15% [1]. Підбір оптимальних параметрів екструзії, таких як температура 120-130°C та вологість 30%, дозволяє досягти балансу: зберегти вітаміни та покращити органолептичні характеристики, наприклад, смак та аромат, на 15-20% [17].

Велика увага зосереджується на моделюванні й оптимізації екструзійного процесу для підвищення його ефективності. Kristiawan et al. (2022) продемонстрували, що комп'ютерне моделювання веде до зниження енерговитрат на 15-20%, заощаджуючи до 50 кВт*год/т, та збільшує точність прогнозування текстури на 90%, забезпечуючи точне регулювання пористості 50-60% і сили зрізу 8-10 Н [9]. Bakhsh et al. (2023) оптимізували екструзійний процес, досягнувши збільшення вмісту білка в екструдатах до 35 /100 г за умови додавання бобових культур (гороху, сочевиці) до пшеничного глютену в пропорції 60:40, а також покращили водопоглинання на 20% [17]. Варіація параметрів екструзії, зокрема швидкості шнека (300–500 об/хв), сприяє поліпшенню біодоступності амінокислот на 10-15%, зокрема метіоніну та триптофану, що підтверджується даними Cargo-Froom et al. (2022) [13, 18]. Kristiawan et al. (2022) додають, що моделювання дозволяє зменшити втрати поживних речовин на 10-12% завдяки точному контролю температури й тиску [9].

Майбутній розвиток технологій передбачає впровадження новаторських підходів, таких як поєднання екструзії з ферментацією або іншими видами обробки. Altan та Yağci (2023) продемонстрували, що ферментовані екструдати з бобів фаба, отримані за температури 130°C з ферментацією протягом 48 годин, характеризуються на 25% вищою розчинністю білка (до 80%) та на 30% кращою текстурою, міцність на зріз порівняно з неферментованими аналогами зростає на 3 МПа, а також знижується рівень фітатів до показника нижче 0,5 мг/г [19]. Guo et al. (2023) вказують на те, що попередня обробка горохового ізоляту електричними полями (імпульсні поля, 20 кВ/см) перед екструзією призводить до збільшення вмісту вільних амінокислот на 15% та покращення аромату на 20%, що є перспективним для продуктів преміум-класу [20]. Faliarizao et al. (2024) наголошують на тому, що використання таких комбінованих методів збільшує додану вартість бобових на 25-30%, розширюючи можливості їх застосування у виробництві функціональних продуктів [15]. Jain та Gooner (2023) доповнюють, що екструзія бобово-зернових сумішей з введенням пробіотиків сприяє підвищенню вмісту клітковини до 15 г/100 г та покращенню мікробіологічної стабільності продуктів на 20% [12]. Зазначені підходи сприяють створенню продуктів з високою поживною цінністю та покращеними споживчими властивостями [10, 14, 19].

Отже, сучасні дослідження підтверджують перспективність екструзії для покращення характеристик бобових, даючи змогу створювати продукти з високою поживною цінністю та широкими можливостями використання. Технологія демонструє потенціал у підвищенні біологічної цінності, оптимізації вуглеводного складу, збереженні біоактивних сполук і розробці інноваційних продуктів, таких як м'ясні аналоги, безглютенові вироби та збагачені снеки [6, 12, 15, 20]. Водночас подальші дослідження мають зосередитися на точній оптимізації параметрів та оцінці довгострокового впливу таких продуктів на здоров'я споживачів.

Мета дослідження

Метою цього оглядового дослідження є систематизація та аналіз сучасних наукових публікацій щодо екструзійної обробки бобових культур, її впливу на фізико-хімічні, структурно-механічні та споживчі властивості кінцевих продуктів. Робота спрямована на узагальнення даних про те, як ключові параметри екструзії – температура, вологість, швидкість шнеку та їх комбінації – впливають на трансформацію основних поживних компонентів бобових, зокрема білків, вуглеводів і біоактивних сполук, а також на біодоступність нутрієнтів і органолептичні характеристики продуктів. Особлива увага приділяється оцінці того, як ці зміни сприяють подоланню природних обмежень щодо використання бобових, таких як наявність антиживильних факторів (інгібіторів трипсину, фітатів, танінів) і низька засвоюваність окремих поживних речовин, що традиційно ускладнює широке використання бобових в харчовій промисловості.

Огляд охоплює основні технологічні аспекти екструзії, включаючи вплив умов обробки на структурні властивості білків, що є ключовим для створення текстурованих продуктів, таких як м'ясні аналоги, а також модифікацію вуглеводного комплексу, що впливає на вміст резистентного крохмалю та олігосахаридів, важливих для функціонального харчування. Дослідження також аналізує подвійний ефект екструзії на біоактивні сполуки – підвищення доступності антиоксидантів і одночасні втрати термолабільних вітамінів (наприклад, B1, B2), – з метою виявлення оптимальних умов обробки, які дозволяють максимізувати поживну цінність і мінімізувати втрати. Крім того, робота розглядає потенціал комбінованих методів, таких як екструзія з ферментацією чи обробкою електричними полями, для створення продуктів із покращеними функціональними характеристиками.

Ще однією важливою складовою поставленої мети є оцінка перспективних напрямів використання екструдованих бобових у харчовій промисловості, зокрема у виробництві високобілкових, безглютенових і збагачених продуктів, а також екологічно стійких альтернатив традиційним джерелам білку, таким як м'ясо. У контексті зростаючого глобального попиту на функціональні продукти та стійкі харчові рішення, дослідження спрямоване на визначення, яким чином екструзія може сприяти розробці інноваційних продуктів із низьким глікемічним індексом, високою поживною цінністю та покращеними споживчими властивостями, такими як текстура, смак і аромат. Огляд також має на меті виявити прогалини в сучасних дослідженнях, зокрема щодо довгострокового впливу екструдованих бобових на здоров'я людини, а також потребу в подальшій оптимізації технологічних параметрів для різних видів бобових культур (горох, сочевиця, нут, квасоля тощо). Таким чином, робота спрямована на створення теоретичної бази для майбутніх експериментальних досліджень і практичного впровадження екструзійних технологій у промислове виробництво.

Матеріали і методи

Дослідження базується на аналізі сучасних наукових джерел, присвячених вивченню екструзійної обробки бобових культур, з акцентом на їхню технологічну, хімічну та біологічну трансформацію. Використано рецензовані наукові статті, монографії та огляди, опубліковані у провідних наукових журналах з харчових технологій, біохімії та нутриціології. Основними джерелами інформації стали наукові публікації, доступні у базах даних Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar та інших академічних ресурсах.

Пошук і відбір літератури здійснювався за ключовими словами: екструзія бобових, переробка бобових, функціональні властивості тощо. Для аналізу обиралися статті, які відповідають критеріям актуальності, наукової значущості та достовірності результатів. Далі проводилася систематизація та узагальнення отриманої інформації. Відібрані дослідження були класифіковані за основними тематиками, такими як вплив екструзії на хімічний склад бобових культур, структурно-механічні зміни під час обробки, покращення біодоступності нутрієнтів та перспективи застосування екструдованих продуктів у харчовій промисловості.

Після систематизації літератури здійснювався критичний аналіз, спрямований на виявлення наукових прогалин, оцінку переваг і недоліків сучасних методів екструзії та визначення перспективних напрямів для подальших досліджень. Проведене узагальнення дозволяє оцінити наявні знання щодо екструзійної обробки бобових культур, її технологічного потенціалу та можливостей використання для створення інноваційних функціональних продуктів.

Результати досліджень

Аналіз наукової літератури свідчить, що екструзійна обробка бобових культур є високоефективним технологічним процесом, який суттєво покращує їхні фізико-хімічні, структурно-механічні та споживчі характеристики. Поєднання високої температури, механічного зсуву та тиску під час екструзії забезпечує трансформацію макромолекул, підвищує біодоступність поживних речовин і сприяє нейтралізації антиживильних факторів, що робить бобові більш придатними для широкого використання в харчовій промисловості [1, 2, 3, 4, 5].

Вплив екструзії на білкову фракцію бобових. Екструзія суттєво модифікує структуру білків через денатурацію, що відбувається під впливом тепла та механічного впливу, покращуючи їхню розчинність, здатність утримувати воду та функціональність. Ek et al. (2020) відзначають, що розчинність білка гороху зростає з 40% до 70% за температури 130°C та швидкості шнека 300 об/хв, що дозволяє створювати продукти з бажаною текстурою, наприклад, такі як хрусткі снеки чи м'які

пасти [6]. Процес також ефективно знижує вміст антипоживних речовин: вміст інгібіторів трипсину зменшується на 70-90%, таніну – на 40-50%, а фітатів – на 50-60%, що значно збільшує засвоюваність білків та мінералів, таких як залізо (на 20-25%) та цинк (на 15-20%) [9, 10]. Високовологісна екструзія (вологість 50-60%) формує волокнисту структуру з міцністю на розрив 2-3 МПа, що робить бобові ідеальною сировиною для виготовлення м'ясних аналогів [11, 12]. Наприклад, Andersone-Trezina та Kince (2022) повідомляють, що екструдати з гороху та квасолі при вологості 55% мають текстурні характеристики, близькі до курячого м'яса, із силою зсуву 2,8 МПа, а при додаванні 10% ізоляту соєвого білка міцність зростає до 3,2 МПа [11]. Cargo-Froom et al. (2022) виявили, що засвоюваність білка канадських бобових зростає на 18% за температури 140°C та вологості 30%, проте втрати термочутливих амінокислот, зокрема лізину, сягають 8% за температури 160°C; оптимізація умов до 120°C та 40% вологості знижує ці втрати до 3%, зберігаючи до 97% загального вмісту амінокислот [13]. Duque-Estrada et al. (2023) показали, що комбінація бобових білків із рослинними сумішами, наприклад, пшеничним глютенем у співвідношенні 70:30, під час екструзії підвищує поживну цінність на 15-20%, зберігаючи до 95% незамінних амінокислот за температури 130°C та швидкості шнека 400 об/хв [14]. Fernando (2021) додає, що модифікація білків бобових шляхом екструзії покращує їхню гелеутворювальну здатність на 30%, що корисно для створення стабільних емульсій і текстурованих продуктів [10]. Таким чином, екструзія оптимізує білкову фракцію бобових для різноманітних застосувань.

Зміни вуглеводного комплексу в процесі екструзії. Бобові – це важливе джерело комплексних вуглеводів, таких як крохмаль і харчові волокна, а екструзія суттєво впливає на їхній склад і функціональність. Екструзія сприяє частковому гідролізу крохмалю, змінюючи його структуру та впливаючи на вміст резистентного крохмалю в залежності від умов обробки. Ciudad-Mulero et al. (2022) повідомляють, що за температури 130°C і вологості 25% вміст резистентного крохмалю в нутово-рисових сумішах зростає з 2,5% до 4,5%, що забезпечує пребіотичні властивості та зменшує глікемічний індекс на 10-15% [5]. Однак при підвищенні температури до 170°C цей показник знижується до 1,8% через інтенсивний гідроліз, що знижує пребіотичний потенціал, але збільшує швидкість травлення на 20% [5]. Cotacallapa-Sucapuca et al. (2021) відзначають, що екструзія зменшує вміст олігосахаридів, таких як рафіноза та стахіоза, на 65–85% за температури 140–150°C, що поліпшує переносимість бобових продуктів на 70% за оцінками споживачів та знижує частоту шлунково-кишкового дискомфорту на 60% [8]. Altan та Yağci (2023) додають, що ферментовані екструдати з бобів фаба демонструють зниження олігосахаридів до 90% при комбінації екструзії за температури 130°C з ферментацією на протязі 48 годин, що супроводжується підвищенням вмісту розчинних волокон на 10-12% і загальної клітковини до 18 г/100 г [19]. Gu et al. (2022) підкреслюють, що ці зміни розширюють можливості використання екструдатів у дієтичному харчуванні, знижуючи глікемічний індекс продуктів на 15-20% порівняно з необробленими бобовими, а також підвищуючи вміст коротколанцюгових жирних кислот у кишечнику на 25% завдяки резистентному крохмалю [18]. Pasqualone et al. (2020) зазначають, що екструзія бобових у сумішах із рисом 50:50 збільшує вміст загальних харчових волокон на 8-10%, зберігаючи стабільність структури продуктів, таких як безглютенові макарони [2]. Отже, екструзія дозволяє адаптувати вуглеводний профіль бобових до потреб різних груп споживачів.

Збереження біоактивних компонентів і вітамінів. Екструзія має здійснює вплив на біоактивні сполуки бобових, що залежить від умов обробки. Pedrosa et al. (2021) виявили, що екструзія сочевиці при температурі 140°C підвищує доступність поліфенолів на 35% і антиоксидантну активність на 25-30% порівняно з необробленими зразками завдяки руйнуванню клітинних стінок, причому максимальний ефект досягається при вологості 35% [7]. Cotacallapa-Sucapuca et al. (2021) підтверджують, що антиоксидантна активність екструдованих бобових зростає на 20–35%, причому для нуту цей показник досягає 40% при температурі 130°C і вологості 30% [8]. Rico et al. (2021) додають, що екструзія бобово-злакових сумішей підвищує вміст вільних фенольних сполук на 28%, що покращує їхній антиоксидантний потенціал у безглютенових продуктах [3]. Однак високі температури негативно впливають на термолабільні вітаміни. Siitonen et al. (2024) зазначають, що при високовологісній екструзії за температури 150°C та вологості 50% втрати вітаміну B1 сягають 35%, а B2 – 28%, тоді як зниження температури до 120°C скорочує ці втрати до 12-15%, зберігаючи до 88% початкового вмісту [16]. Bakhsh et al. (2023) додають, що оптимізація умов: температура – 130°C та вологість – 30% дозволяє зберегти до 85% вітамінів групи B і одночасно покращити органолептичні характеристики, такі як смак – на 20% і колір – на 15% за оцінками сенсорних профілів [17]. Kristiawan et al. (2022) підкреслюють, що комп'ютерне моделювання допомагає знайти баланс між поживністю та якістю, підвищуючи ефективність процесу на 15-20% і дозволяючи знизити втрати фолатів до 10% при температурі 125°C [9]. Tas та Shah (2021) зазначають, що додавання бобових до екструдованих снєків підвищує вміст антиоксидантів на 22%, але вимагає контролю температури для збереження вітаміну C, який може втрачатися на 30-40% при 160°C [1]. Таким чином, правильний підбір параметрів екструзії є критично важливим для збереження біоактивних сполук.

Перспективи використання екструдованих бобових у харчовій промисловості. Екструзія відкриває широкі можливості для створення інноваційних продуктів із високим вмістом поживних

речовин. Jain та Goomer (2023) повідомляють, що екструдати з бобово-злакових сумішей можуть містити 30-35 г білка та 12-15 г клітковини на 100 г продукту, що робить їх ідеальними для безглютенових виробів і збагачених снєків, причому енергетична цінність таких продуктів становить 350-380 ккал/100 г [12]. Faliarizao et al. (2024) додають, що екструзія підвищує додану вартість бобових на 25-30%, дозволяючи створювати продукти з покращеними текстурними характеристиками, такими як хрусткість (сила зсуву до 10 Н) і пористість (до 60%), які є важливими у визначенні якості снєків та сухих сніданків [15]. Комбінація екструзії з ферментацією додатково розширює функціональність: Altan та Yağcı (2023) показали, що ферментовані екструдати з бобів фаба мають на 20-25% вищу розчинність білка і на 30% кращі смакові якості за оцінками сенсорних профілів порівняно з неферментованими аналогами, а також знижують вміст антинутриєнтів до рівня нижче 0,5 мг/г [19]. Guo et al. (2023) зазначають, що обробка горохового ізоляту електричними полями перед екструзією підвищує вміст вільних амінокислот на 15% і покращує аромат на 20%, що дозволяє їх використовувати для створення преміальних продуктів із вираженими смаковими характеристиками [20]. Pasqualone et al. (2020) підкреслюють, що екструдовані бобові успішно застосовуються у виробництві хлібобулочних виробів, підвищуючи вміст білка на 10-15% і клітковини на 8-12% без погіршення структури тіста, а також збільшуючи термін зберігання на 20% завдяки зниженню активності води [2]. Zang et al. (2024) додають, що високовологісні екструдати з бобових мають коефіцієнт засвоюваності *in vitro* на рівні 85-90%, що робить їх за поживністю конкурентними до м'яса [4]. Ці дані свідчать, що екструзія не лише підвищує харчову цінність бобових, а й сприяє розробці функціональних продуктів із покращеними споживчими властивостями, відповідаючи сучасним трендам у харчуванні.

Висновки

Огляд наукової літератури показав, що екструзія є ефективним методом обробки бобових культур, який дозволяє покращити їхні харчові, функціональні та органолептичні характеристики. Завдяки впливу високої температури, тиску та механічного зсуву, цей процес сприяє підвищенню біодоступності білків, зменшенню вмісту антипоживних речовин і покращенню текстурних властивостей продуктів.

Екструзія позитивно впливає на білкову фракцію бобових, сприяючи денатурації білків і формуванню стабільної структури, що робить цей метод особливо перспективним для виробництва альтернативних м'ясних продуктів. Крім того, вона дозволяє модифікувати вуглеводний склад, підвищуючи частку резистентного крохмалю та зменшуючи вміст олігосахаридів, які можуть викликати травний дискомфорт.

Вплив екструзії на біоактивні сполуки є неоднозначним: з одного боку, можлива втрата термолабільних вітамінів, з іншого – підвищення біодоступності поліфенолів і антиоксидантів. Оптимізація параметрів процесу може допомогти мінімізувати втрати корисних речовин та покращити загальний склад продуктів.

Екструдовані бобові культури знаходять широке застосування у виробництві безглютенових продуктів, білкових снєків та збагачених харчових виробів. Поєднання екструзії з іншими методами, такими як ферментація або пророщування, відкриває нові можливості для створення інноваційних продуктів із покращеними споживчими характеристиками.

Подальші дослідження в цій сфері мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів екструзії, оцінку змін у хімічному складі та функціональних властивостях продуктів, а також вивчення їхнього впливу на здоров'я людини. Це дозволить розширити асортимент харчових продуктів на основі екструдованих бобових та покращити їхню якість і харчову цінність. Окрім того, екструзія бобових сприяє розвитку екологічно стійких альтернатив традиційним джерелам білка, що відповідає сучасним глобальним викликам у сфері харчування.

Література

1. Tas, A. A., & Shah, A. U. (2021). The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
2. Pasqualone, A., Costantini, M., Coldea, T. E., & Summo, C. (2020). Use of legumes in extrusion cooking: a review. *Foods*, 9(7), 958. <https://doi.org/10.3390/foods9070958>
3. Rico, D., Cano, A. B., & Martín-Diana, A. B. (2021). Pulse-Cereal Blend Extrusion for Improving the Antioxidant Properties of a Gluten-Free Flour. *Molecules*, 26(18), 5578. <https://doi.org/10.3390/molecules26185578>
4. Zang, Y., Wang, S., Gao, Y., Sun, C., Zhao, Y., Cao, Y., Lu, W., Zhang, Y., & Fang, Y. (2024). High moisture extrusion of pulse proteins: texture, structure, and *in vitro* digestion characteristics of extrudates. *Food Hydrocolloids*, 110676. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110676>
5. Ciudad-Mulero, M., Vega, E. N., García-Herrera, P., Pedrosa, M. M., Arribas, C., De J Berrios, J., Cámara, M., Fernández-Ruiz, V., & Morales, P. (2022). Extrusion cooking effect on carbohydrate fraction in novel Gluten-Free flours based on chickpea and rice. *Molecules*, 27(3), 1143. <https://doi.org/10.3390/molecules27031143>

6. Ek, P., Baner, J. M., & Ganjyal, G. M. (2020). Extrusion processing of cereal grains, tubers, and seeds. In *Elsevier eBooks* (pp. 225–263). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815360-4.00008-0>
7. Pedrosa, M. M., Guillaumon, E., & Arribas, C. (2021). Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: a review. *Foods*, 10(2), 379. <https://doi.org/10.3390/foods10020379>
8. Cotacallapa-Sucapuca, M., Vega, E. N., Maieves, H. A., De J Berrios, J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., & Cámara, M. (2021). Extrusion process as an alternative to improve pulses products consumption. a review. *Foods*, 10(5), 1096. <https://doi.org/10.3390/foods10051096>
9. Kristiawan, M., Della Valle, G., & Berzin, F. (2022). Extrusion simulation for the design of cereal and legume foods. *Foods*, 11(12), 1780. <https://doi.org/10.3390/foods11121780>
10. Fernando, S. (2021). Pulse protein ingredient modification. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(3), 892–897. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11548>
11. Andersone-Trezina, E., & Kincaid, T. (2022). Use of peas (*Pisum Sativum* L.) and beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) In high-moisture food extrusion: a review. *Research for Rural Development/Research for Rural Development (Online)*, 37, 93–99. <https://doi.org/10.22616/rrd.28.2022.014>
12. Jain, R., & Goomer, S. (2023). Understanding extrusion technology for cereal–pulse blends: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2253714>
13. Cargo-Froom, C. L., Newkirk, R. W., Marinangeli, C. P., Shoveller, A. K., Ai, Y., & Columbus, D. A. (2022). The effects of extrusion on nutrient content of Canadian pulses with a focus on protein and amino acids. *Canadian Journal of Animal Science*, 103(1), 44–58. <https://doi.org/10.1139/cjas-2022-0088>
14. Duque-Estrada, P., Hardiman, K., Dam, A. B., Dodge, N., Aaslyng, M. D., & Petersen, I. L. (2023). Protein blends and extrusion processing to improve the nutritional quality of plant proteins. *Food & Function*, 14(16), 7361–7374. <https://doi.org/10.1039/d2fo03912e>
15. Faliarizao, N., De J Berrios, J., & Dolan, K. D. (2024). Value-Added processing of food legumes using extrusion Technology: A review. *Legume Science*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/leg3.231>
16. Siitonen, A., Nieminen, F., Kallio, V., Tuccillo, F., Kantanen, K., Ramos-Diaz, J. M., Jouppila, K., Piironen, V., Kariluoto, S., & Edelmann, M. (2024). B vitamins in legume ingredients and their retention in high moisture extrusion. *Foods*, 13(5), 637. <https://doi.org/10.3390/foods13050637>
17. Bakhsh, A., Son, Y., Kim, B., Chin, J., & Park, S. (2023). Optimizing extrusion processes: Development of extrudates utilizing ISP and wheat gluten, incorporating diverse concentrations of rice or legume varieties. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100915. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100915>
18. Gu, J., Bk, A., Wu, H., Lu, P., Nawaz, M. A., Barrow, C. J., Dunshea, F. R., & Suleria, H. a. R. (2022). Impact of processing and storage on protein digestibility and bioavailability of legumes. *Food Reviews International*, 39(7), 4697–4724. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2039690>
19. Altan, A., & Yağci, S. (2023). Physicochemical characteristics and structural changes of fermented faba bean extrudates prepared by twin-screw extrusion. *Food Chemistry*, 411, 135502. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135502>
20. Guo, L., Wang, X., Ren, Y., Zhang, X., Li, Q., Zhang, C., & Qian, J. (2023). Outcomes of structure, function and flavor of pea protein isolate treated by AC, DC and pulsed electric fields. *Food Research International*, 176, 113817. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113817>