Технічні науки

УДК 613.2:577.115:796

Бондар Богдан Сергійович

аспірант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції

Національного університету харчових технологій

Bondar Bogdan

Postgraduate Student at the Department of

Restaurant and Ayurvedic Product Technology

National University of Food Technologies

Нєміріч Олександра Володимирівна

доктор технічних наук, професор кафедри

технології ресторанної і аюрведичної продукції

Національний університет харчових технологій

Niemirich Oleksandra

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of

Restaurant and Ayurvedic Product Technology

National University of Food Technologies

DOI: https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-10-12176

ФЕРМЕНТОВАНІ ВОЛОКНА В СУХІЙ КОМПОЗИТНІЙ БІЛКОВО-ВІТАМІННІЙ СУМІШІ ДЛЯ СПОРТСМЕНІВ
FERMENTABLE DIETARY FIBERS IN DRY COMPOSITE PROTEIN-VITAMIN MIXTURE FOR ATHLETES

Анотація. *Обґрунтовано науково-технологічний підхід до включення ферментованих харчових волокон до складу сухої композитної протеїново-*

вітамінної суміші (ПВС) для харчування спортсменів. На підставі літературних даних 2021–2025 рр. розглянуто інулін, фруктоолігосахариди, резистентний крохмаль, висівки та розчинні волокна як субстрати мікробної ферментації, що можуть сприяти утворенню коротколанцюгових жирних кислот (КЖК). Показано, що для сухого порошку технологічно доцільніше створювати умови для ендогенного утворення КЖК, ніж вносити леткі кислоти безпосередньо. Запропоновано розширити математичну модель проєктування ПВС обмеженнями за вмістом ферментованих волокон, вологи та відновлювальних цукрів і поєднати амінокислотний скор із показником DIAAS за наявності даних про перетравність амінокислот. Робота має теоретико-аналітичний характер; запропоновані обмеження та кількісні параметри потребують експериментальної перевірки.

Ключові слова: *суха композитна білково-вітамінна суміш, спортивне харчування, харчові волокна, пребіотики, коротколанцюгові жирні кислоти, амінокислотний скор, DIAAS, математичне моделювання, рецептура.*

Summary. *A scientific and technological approach to including fermentable dietary fibers in a dry composite protein-vitamin mixture (PVM) for athletes' nutrition is substantiated. Based on literature data for 2021–2025, inulin, fructooligosaccharides, resistant starch, bran and soluble fibers are considered as substrates of microbial fermentation that may contribute to the formation of short-chain fatty acids (SCFAs). It is shown that, for a dry powder, it is technologically more expedient to create conditions for endogenous SCFA formation than to add volatile acids directly. It is proposed to extend the mathematical model for designing the PVM with constraints on the content of fermentable fibers, moisture and reducing sugars, and to combine the amino acid score with DIAAS where amino acid digestibility data are available. The study is*

theoretical and analytical; the proposed constraints and quantitative parameters require experimental verification.

Key words: *dry composite protein-vitamin mixture, sports nutrition, dietary fiber, prebiotics, short-chain fatty acids, amino acid score, DIAAS, mathematical modeling, formulation.*

Вступ. Харчування спортсменів традиційно розглядають через енергію, білок, вуглеводи, жири, вітаміни та мінеральні речовини. Однак кишкова мікробіота дедалі частіше постає як ланка між харчуванням, фізичним навантаженням і метаболізмом. Для спортсменів це має практичне значення: тривалі й інтенсивні навантаження, зміни режиму харчування та високобілкові раціони можуть супроводжуватися змінами кишкового середовища. За оглядовими даними, типові для спорту дієтичні стратегії, що поєднують багато білка та простих вуглеводів із малою кількістю клітковини, здатні погіршувати стан мікробіоти й через це позначатися на працездатності [1].

Одним із функціонально значущих продуктів мікробної ферментації неперетравлених вуглеводів є КЖК, передусім ацетат, пропіонат і бутират, які разом становлять понад 95 % усіх КЖК кишечнику [2]. Їх утворення залежить від складу субстратів і мікробної спільноти: представники Bacteroidetes переважно виробляють ацетат і пропіонат, а Firmicutes – бутират [2]. Тому сама наявність харчового волокна ще не означає однакового ефекту для різних продуктів чи груп споживачів.

Для технології сухих композитних ПВС звідси випливає комплексна задача: забезпечити потрібну частку білка та якісний амінокислотний профіль, не погіршивши сипкість, розчинність, гігроскопічність і органолептику порошку. Тому функціональні волокна ми розглядаємо як окремий блок рецептури, що впливає і на харчову цінність, і на технологічні властивості продукту.

Актуальність теми. Дослідження пов'язують фізичну активність і характер харчування з особливостями мікробіоти спортсменів: у них частіше виявляють продуцентів КЖК, а вміст самих кислот вищий, ніж у людей із малорухливим способом життя [3, с. 56, 58]. Разом з цим автори українського огляду, який охопив 42 публікації, наголошують на труднощах інтерпретації: результати залежать від дієти, обсягу тренувань, прийому антибіотиків і методики аналізу зразків, тож причинно-наслідковий зв'язок встановити складно [3, с. 58]. Зв'язок бактерій роду Veillonella з витривалістю, який нерідко наводять як приклад, підтверджено в експерименті на мишах [3, с. 59]. Тому КЖК тут не розглядаються як гарантований ергогенний чинник: предметом обґрунтування є рецептура, що містить субстрати для їх потенційного утворення.

З технологічного боку картина теж неоднозначна. На вітчизняному ринку переважає імпортна продукція або продукція на імпортній сировині, а найпоширеніша для сухих сумішей технологія сухого змішування спрощує виробництво, проте обмежує вплив на якість окремих компонентів [4, с. 43–44]. Волокна нерідко пропонують окремою добавкою; прикладом є комплекс із полідекстрози, інуліну, частково гідролізованої гуарової камеді, гуміарабіку та лушпиння подорожника [4, с. 46]. У готових продуктах вибір волокна не завжди вдалий: для ізомальтоолігосахаридів, які були основним джерелом волокон в одного з проаналізованих брендів протеїнових батончиків, автори вказують на ризик дискомфорту в травленні за надмірного споживання [5, с. 28].

Наукова проблема полягає у відсутності єдиного рецептурного критерію, який одночасно враховував би білкову повноцінність ПВС, потенціал ферментації волокон і технологічну придатність порошку. Звідси потреба в багатокритеріальному проєктуванні, а не в механічному додаванні пребіотика.

Мета роботи – теоретично обґрунтувати принципи включення ферментованих харчових волокон до складу сухої композитної ПВС для спортсменів із одночасним забезпеченням білкової якості, технологічної стабільності та можливості математичної оптимізації рецептури.

Матеріали та методи. Дослідження має теоретико-аналітичний характер, власних експериментальних даних у ньому немає. Джерела добирали у відкритих наукових базах, на сайтах журналів і в репозитаріях українських закладів вищої освіти; до аналізу залучали публікації 2021–2025 рр. із DOI, що стосуються мікробіоти спортсменів, пребіотичних волокон, спортивних сумішей і методів оцінювання білкової якості. Компоненти порівнювали за критеріями ферментованості, технологічної сумісності із сухою порошкоподібною системою, впливу на фізичні властивості та ризику травного дискомфорту.

Амінокислотний скор, який застосовують під час комп'ютерного моделювання комбінованих рослинних протеїнів [6, с. 111–112], визначали за співвідношенням вмісту незамінної амінокислоти в білку суміші до її вмісту в еталонному профілі:

$$\mathrm{AC}_j = \frac{A_j}{A_{\mathrm{ref},j}} \times 100\,\%, \qquad (1)$$

де $\mathrm{AC_j}$ – скор *j*-ї незамінної амінокислоти; A_j – її вміст у білку суміші; $A_{\mathrm{ref,j}}$ – вміст тієї самої амінокислоти в еталонному білку. Якщо відомі коефіцієнти істинної клубової перетравності, якість білка можна уточнити за показником DIAAS [7]:

$$\mathrm{DIAAS}_j = 100 \times \frac{A_j \cdot D_j}{A_{\mathrm{ref},j}}, \qquad (2)$$

де D_j – істинна клубова перетравність *j*-ї амінокислоти; підсумкове значення визначає перша лімітуюча амінокислота [7]. Значення DIAAS окремих інгредієнтів не є адитивними, тому для суміші їх не усереднюють, а розраховують за сумарною кількістю засвоюваних амінокислот усіх компонентів [7]:

$$\text{DIAAS}_j(\text{суміш}) = 100 \times \frac{\frac{\sum_i a_{ij} d_{ij} p_i x_i}{\sum_i p_i x_i}}{A_{\text{ref},j}}, \quad (3)$$

де x_i – масова частка i-го компонента; p_i – його вміст білка; a_{ij} – вміст j-ї амінокислоти в білку компонента; d_{ij} – її перетравність. Якщо надійних даних про перетравність немає, DIAAS не слід подавати як встановлене значення: у такому разі він залишається елементом майбутньої моделі.

Результати та обговорення.

1. Прекурсори замість готових КЖК.

Пряме внесення КЖК або їхніх солей до сухого порошку має очевидні недоліки. Масляна кислота летка та має різкий запах, тому навіть невеликі втрати під час змішування чи зберігання відчутно позначаться на органолептиці; сіль, у свою чергу, змінює мінеральний профіль рецептури. Логічнішим видається внесення харчових субстратів, які ферментуються мікробіотою товстої кишки, тобто створення умов для утворення КЖК там, де їх зазвичай виробляє мікробіота [2]. Такий підхід не гарантує підвищення рівня КЖК, а лише закладає для нього субстратну основу. Реакція залежить від структури волокна, дози, раціону, складу мікробіоти та індивідуальної переносимості [3, с. 58], тому доцільніше поєднувати компоненти з різними функціонально-технологічними характеристиками, ніж покладатися на універсальний ефект одного волокна.

2. Порівняльна характеристика компонентів.

Результати порівняння кандидатних компонентів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Функціонально-технологічна характеристика кандидатних ферментованих волокон

Компонент	Функціональна роль	Технологічна характеристика та обмеження	Джерело
Інулін і фруктоолігосахариди	Ферментований субстрат; впливає на склад мікробіоти й кишковий транзит	Коротколанцюгові форми добре розчинні; використовуються як замінники жиру й цукру та текстурувальні агенти; режими обробки можуть змінювати структуру	[8]
Резистентний крохмаль	Субстрат ферментації; може змінювати рівень КЖК і склад мікроорганізмів	Збільшує об'єм продукту, може покращувати текстуру	[9]
Вівсяні й пшеничні висівки	Джерело волокон із пребіотичною дією	Водоутримна здатність 4,2±0,3 та 3,9±0,4 г/г; у батончиках оптимальним визначено 15–20 %, надмір підвищує крихкість	[5, с. 28–31]
Комплекси волокон (інулін, гуарова камедь, гуміарабік, подорожник)	Приклад готових добавок для спортсменів	Нейтральні за смаком і запахом, зв'язують і утримують воду, покращують сипкість суміші	[4, с. 46]

Джерело: складено автором на основі [4, с. 46; 5, с. 28–31; 8; 9]

Жоден компонент не закриває всіх вимог одразу. Інулін добре розчиняється й зручний технологічно, проте саме він, імовірно, найчастіше спричиняв би травний дискомфорт за завищених доз; це наше припущення за аналогією з ізомальтоолігосахаридами [5, с. 28], і воно потребує перевірки. Резистентний крохмаль і висівки менш зручні щодо розчинності, зате додають об'єм і структуру, що для порошку, який відновлюють у воді, може бути і перевагою, і недоліком. Тому ми схильні до комбінації двох–трьох волокон у помірній сумарній дозі, а не до одного компонента у

великій кількості, так само побудовані й готові спортивні комплекси волокон [4, с. 46]. Отже, вибір компонента не може ґрунтуватися лише на потенціалі ферментації: для сухої ПВС не менш важливі диспергованість, водоутримання, насипна густина, схильність до злежування та поведінка під час відновлення.

3. Вплив волокон на білкову складову.

Додавання волокон зменшує відносну частку білка в одиниці маси суміші, тому їх потрібно вводити в білкову модель, а не поруч із нею. Особливо чутливим залишається баланс лізину та сірковмісних амінокислот у комбінованих рослинних білках: наприклад, першою лімітуючою амінокислотою для білка пшениці є лейцин, другою – лізин, а для бобових – метіонін із цистином [6, с. 112], а в соняшниковому ізоляті лізину менше, ніж у соєвому [5, с. 30]. До цього додається технологічний ризик: за нагрівання й зберігання лізин особливо вразливий до реакцій типу Майяра, через що для оброблених продуктів у розрахунок DIAAS заведено засвоюваний реактивний лізин [7]. Звідси випливає потреба обмежувати вміст вільних відновлювальних цукрів у рецептурі та контролювати доступний лізин у готовому порошку.

У цьому контексті амінокислотний скор виступає первинним інструментом рецептурного контролю, а DIAAS може стати наступним рівнем оцінювання, якщо для конкретних білкових інгредієнтів є валідні дані про перетравність окремих амінокислот [7].

4. Розширена математична модель проєктування ПВС.

Нехай x_i – масова частка i-го компонента в рецептурі. Базові умови:

$$\sum_i x_i = 1,\ x_i \geq 0. \quad (4)$$

Для забезпечення потрібного рівня білка:

$$P_{min} \leq \sum_i p_i\, x_i \leq P_{max}, \quad (5)$$

Блок ферментованих волокон, де f_i – їхня частка в i-му компоненті, а F_{min} і F_{max} задають технологічно та фізіологічно прийнятний інтервал:

$$F_{min} \leq \sum_i f_i\, x_i \leq F_{max}. \quad (6)$$

Контроль вільних відновлювальних цукрів, вологи та вітамінної повноти:

$$\sum_i s_i\, x_i \leq S_{max}, \quad (7)$$

$$\sum_i w_i\, x_i \leq W_{max}, \quad (8)$$

$$\sum_i v_i\, x_i \geq V_{min}, \quad (9)$$

де s_i, w_i, v_i – вміст відновлювальних цукрів, вологи та нормованого вітаміну в i-му компоненті. Рецептура в такому вигляді стає задачею лінійного або багатокритеріального програмування, для якої, на відміну від підходу [6], лише амінокислотний критерій уже недостатній. Для порівняння допустимих варіантів пропонуємо нормовану функцію корисності:

$$maxZ = \alpha_1 Q_{\text{prot}} + \alpha_2 Q_{\text{fib}} + \alpha_3 Q_{\text{tech}} - \alpha_4 C - \alpha_5 R, \quad (10)$$

де Q_{prot} – нормована оцінка білкової якості (амінокислотний скор або DIAAS); Q_{fib} – відповідність вмісту ферментованих волокон заданому інтервалу; Q_{tech} – технологічна придатність; C – економічний критерій; R – інтегральний показник технологічних ризиків; α_i – вагові коефіцієнти. Вагові коефіцієнти не можна задавати довільно як науковий результат: їх визначають експертним методом, аналізом чутливості або за сценаріями оптимізації. Практично модель реалізується засобами Excel Solver або Python.

5. Технологічні критерії контролю.

Для подальшої перевірки модельних рецептур пропонуємо такий мінімальний набір показників: масова частка вологи (гравіметрично) та активність води (інструментально), що визначають стабільність порошку; сипкість (кут природного укосу, індекси Карра чи Гауснера), від якої залежать дозування й однорідність суміші; розчинність і диспергованість у воді після відновлення; гігроскопічність за прискореного зберігання при заданій відносній вологості; вміст доступного лізину хроматографічним або

валідованим колориметричним методом як контроль можливого погіршення якості білка.

6. Наукова новизна, практичне значення та обмеження.

Наукова новизна полягає в тому, що ферментовані волокна розглянуто як окремий функціонально-технологічний блок рецептури сухої ПВС і введено відповідні показники в систему обмежень разом із критеріями білкової якості. Практичне значення – не в універсальній рецептурі, а в алгоритмі добору та кількісного узгодження компонентів із наступною експериментальною перевіркою.

Робота не містить власних експериментальних даних, тому числові межі введення волокон, прогнозований рівень утворення КЖК, значення DIAAS конкретної ПВС і технологічні показники не можна вважати встановленими результатами. Дані про мікробіоту спортсменів переважно асоціативні [3, с. 58], а показник DIAAS потребує даних про перетравність окремих амінокислот, які доступні не для всіх інгредієнтів [7].

Висновки.

1. Ферментовані харчові волокна доцільно розглядати як функціонально-технологічний компонент сухої композитної ПВС, а не лише як джерело клітковини. Їхня потенційна роль полягає у створенні субстратної основи для мікробного утворення КЖК, однак цей ефект потребує підтвердження для конкретної рецептури.

2. Для сухих ПВС технологічно обґрунтованішим є формування умов для ендогенного утворення КЖК, ніж пряме внесення летких кислот. Вибір волокна має враховувати не лише ферментованість, а й розчинність, гігроскопічність, сипкість, водоутримання та переносимість.

3. Рецептурну модель доцільно доповнити обмеженнями за білком, ферментованими волокнами, відновлювальними цукрами, вологою, вітамінами та технологічними показниками, що дозволяє формалізувати компроміс між харчовою та технологічною функціональністю.

4. Амінокислотний скор може бути базовим критерієм білкової повноцінності, а DIAAS слід залучати за наявності валідних даних про істинну клубову перетравність незамінних амінокислот.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну оптимізацію рецептури, визначення фізико-технологічних властивостей порошку, контроль доступного лізину, оцінювання профілю КЖК у модельних умовах ферментації та перевірку стабільності під час зберігання.

Література

1. Hughes R. L., Holscher H. D. Fueling gut microbes: a review of the interaction between diet, exercise, and the gut microbiota in athletes. *Advances in Nutrition.* 2021. Vol. 12, No. 6. P. 2190–2215. DOI: https://doi.org/10.1093/advances/nmab077

2. Степанов Ю. М., Тітова М. В. Особливості дисбіотичних змін товстого кишечнику та показників коротколанцюгових жирних кислот у пацієнтів із хронічними запальними захворюваннями кишечнику залежно від нутритивного статусу. *Український медичний часопис*. 2021. № 4 (144). DOI: https://doi.org/10.32471/umj.1680-3051.144.213766

3. Palladina O., Kaliga A. Microbiome of athletes: its features and diversity: a literature review. *International Journal of Medicine and Medical Research.* 2024. Vol. 10, No. 1. P. 56–63. DOI: https://doi.org/10.61751/ijmmr/1.2024.56

4. Авдєєва Л. Ю., Декуша Г. В., Турчина Т. Я., Макаренко А. А. Особливості складу гейнерів як актуального виду спортивного харчування. *Наукові праці Одеського національного технологічного університету*. 2024. Т. 88, вип. 1. С. 43–48. DOI: https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2958

5. Chernenko S. Use of sunflower protein isolate and brans in the technology of production of sports bars. Grain Products and Mixed Fodder's.

2025. Vol. 25, No. 1 (97). P. 27–32. DOI: https://doi.org/10.15673/gpmf.v25i1.3072

6. Стеценко Н. О., Гойко І. Ю. Комп'ютерне моделювання рецептури комбінованого рослинного протеїну для харчування спортсменів. *Modern Engineering and Innovative Technologies.* 2022. Issue 19, Part 1. P. 110–115. DOI: https://doi.org/10.30890/2567-5273.2022-19-01-047

7. Moughan P. J., Lim W. X. J. Digestible indispensable amino acid score (DIAAS): 10 years on. *Frontiers in Nutrition*. 2024. Vol. 11. Article 1389719. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1389719

8. Jackson P. P. J., Wijeyesekera A., Rastall R. A. Inulin-type fructans and short-chain fructooligosaccharides – their role within the food industry as fat and sugar replacers and texture modifiers – what needs to be considered! *Food Science & Nutrition.* 2023. Vol. 11, No. 1. P. 17–38. DOI: https://doi.org/10.1002/fsn3.3040

9. Wang Z., Wang S., Xu Q., Kong Q., Li F., Lu L., Xu Y., Wei Y. Synthesis and functions of resistant starch. *Advances in Nutrition*. 2023. Vol. 14, No. 5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advnut.2023.06.001