



UDC 664:547.962.9:641.5

THE USE OF BIOMODIFIED COLLAGEN-CONTAINING RAW MATERIALS IN THE DESIGN OF TECHNOLOGICAL ADDITIVES FOR THE PRODUCTION OF FOOD PRODUCTS

Nadiia A. Dzyuba

Uzhhorod Trade and Economic Institute of DTEU, Ukraine

Received 28 July 2025; accepted 25 December 2025; available online 23 March 2026

Abstract

Resources of collagen-containing raw materials are quite significant. These include products of secondary fish processing that are not used and not recycled. Therefore, it is necessary to apply special methods of processing collagen-containing raw materials, in particular scales, fins, heads and bones, to obtain a protein product with proper functional and technological characteristics. Today, there are many ways to influence collagen-containing raw materials and obtain collagen preparations for use in the food industry, cosmetology, medicine, etc. The purpose of the work is to scientifically substantiate and experimentally confirm the possibility of obtaining high-quality protein products from collagen-containing raw materials (in particular from fish) by using various methods of its processing. The study used modern standard and generally recognized methods for determining physicochemical and structural and mechanical properties. Studies of the chemical composition of the starting raw materials (fish waste of various species of fish) were conducted. The results of the study indicate the possibility of using this raw material as a component of additive formulations. A study of collagen-containing fish scales was conducted, confirming the possibility of using collagen-containing products as stabilizers. Collagen hydrolysate in the composition of the supplement affects the quality characteristics of finished products. It can be concluded that the use of fish scales to obtain collagen hydrolysate for the production of supplements is possible only if they are pre-processed, namely separated from the fish carcass. The method of obtaining these products determines the directions of their further use. It is possible to use a supplement with collagen hydrolysate obtained from secondary fish raw materials in food production.

Keywords: collagen; biomodified collagen-containing raw materials; biophysical properties of collagen hydrolysate.

ВИКОРИСТАННЯ БІМОДЕФІКОВАНОЇ КОЛАГЕНВМІСНОЇ СИРОВИНИ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОБАВОК У ВИРОБНИЦТВІ КУЛІНАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Надія А. Дзюба

Ужгородський торговельно-економічний інститут ДТЕУ, Православна набережна, 21 А, Ужгород, 88000 Україна

Анотація

Ресурси колагеновмісної сировини доволі значні. До них відносяться і продукти вторинної переробки риби, які не використовуються та не утилізуються. Тому необхідно застосовувати спеціальні методи обробки колагеновмісної сировини, зокрема луски, плавників, голів та кісток для отримання білкового продукту з належними функціонально-технологічними характеристиками. Сьогодні існує багато способів впливу на колагеновмісну сировину та отримання колагенових препаратів для використання в харчовій промисловості, косметології, медицині тощо. Метою роботи є наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження можливості отримання високоякісних білкових продуктів з колагеновмісної сировини (зокрема з риби) шляхом залучення різних способів її обробки. В дослідженні використовували сучасні стандартні та загальновизнані методи визначання фізико-хімічних та структурно-механічних властивостей. Проведені дослідження хімічного складу вихідної сировини (рибних відходів різних видів риби). Результати дослідження вказують на можливість використання даної сировини в якості складової частини рецептур добавок. Проведено дослідження колагеновмісної луски риби підтверджує можливість використання колагеновмісних продуктів у якості стабілізаторів. Гідролізат колагену в складі добавки впливає на якісні характеристики готових продуктів. Можна зробити висновки, що використання луски риби для отримання гідролізату колагену для виробництва добавок можливо тільки за умови їх попередньої обробки, а саме відділення її від тушки риби. Спосіб отримання цих продуктів визначає напрями їхнього подальшого використання. Використовувати добавку з гідролізатом колагену, отриманого із вторинної рибної сировини, можливо в харчовому виробництві.

Ключові слова: колаген; біомодефікована колагенвмісна сировина; біофізичні властивості гідролізата колагену.

*Corresponding author: e-mail: dzyubanadya282@gmail.com

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v34i1.336412

Вступ

На даний час виробництво рибної продукції супроводжується утворенням великої кількості вторинної білоквмісної сировини (кістки, плавники, шкіра, луска, нутроці, голови і т. д.), яка становить більш ніж 60 % від маси вихідної сировини. Така сировина має в своєму складі білок та в більшості випадків переробляється на продукти з низькою ринковою вартістю, такі як комбікорми, рибне борошно, добрива [1; 2]. З огляду на велику кількість рибних відходів стає проблема їх переробки [3] особливо з метою отримання високобілкових продуктів зі збалансованим амінокислотним складом. Однак, враховуючи складність білкових молекул, постає питання проведення гідролізу рибної сировини. Невраховані джерела і практичний досвід дозволяють збільшити потенціал даної сировини на 30 %.

Тому основним джерелом виділення колагенового білка обрано вторинну рибну сировину (ВРС).

Практичний інтерес для проектування кулінарної продукції представляють дослідження процесу виділення біологічно активних речовин (БАР) колагенової природи з рибної сировини, перш за все низькомолекулярних пептидів, що мають підвищену біологічну активність [3]. Подальше комбінування натуральних колагенових БАР у складі кулінарної продукції з іншими цінними поживними речовинами (вуглеводами, вітамінами, мінералами та ін.) з метою досягнення синергічного ергогенного ефекту дозволить істотно розширити асортимент кулінарної продукції, цільову аудиторію і ефективність застосування в

харчових технологіях [3–8].

Постановка проблеми. В якості вихідного матеріалу – джерела колагенових БАР – розглядалися луска, голови, кістки, що залишаються після філірування риби. Дана сировина є прекрасним середовищем для активного розвитку мікробного консорціума, що обумовлено високим вмістом вологи і слизу. В зв'язку з цим сировину необхідно відразу направляти на переробку або заморожувати. За відсутності морозильних установок ВРС можна піддавати сушці після попереднього миття водою. Однак під час сушіння відбувається окиснення ліпідів жирової фракції, що викликає появу специфічного запаху. До того ж сушіння ускладнює і здорожує процес переробки ВРС, у зв'язку з чим у розробленій технології для отримання колагенового препарату використано заморожування.

У виборі сировини для отримання колагенового препарату керувалися результатами порівняльного аналізу загального хімічного складу досліджуваного матеріалу, підданого заморожуванню (таблиця 1).

Дані таблиці 1 показали, що найбільша кількість білків, в тому числі колагенової природи, локалізується в лусці риб (56.7–60.5 % маси сухих речовин), що корелює з даними [8; 9]. У ній також акумулюються в досить високій кількості мінеральні речовини (10.9–12.1 % сухих речовин). Даний фактор дозволяє стверджувати, що луска може бути використана як потенційне джерело активних пептидів колагену для розробки кулінарної продукції, косметичних, біомедичних та фармацевтичних засобів [10–13].

Total chemical composition of HRS (g/100g) (n=5, P=0.95)

Table 1

Таблиця 1

Вид сировини	Загальний хімічний склад ВРС (г/100г) (n=5, P=0.95)			
	сухих речовин	білків	мінеральних речовин	жиру
Сардина				
голови	34.6±0.01	46.2±0.01	25.5±0.01	28.3±0.01
луска	27.1±0.01	56.7±0.01	12.1±0.01	31.3±0.01
кістки	41.0±0.01	42.0±0.01	9.3±0.01	48.7±0.01
шкура	22.5±0.01	18.7±0.01	1.2±0.01	4.1±0.01
Сардинелла				
голови	37.4±0.01	41.7±0.01	18.6±0.01	39.7±0.01
луска	33.3±0.01	60.5±0.01	10.9±0.01	28.6±0.01
кістки	41.5±0.01	42.4±0.01	9.32±0.01	48.3±0.01
шкура	25.5±0.01	18.9±0.01	1.8±0.01	5.6±0.01
Короп				
голови	35.0±0.01	45.1±0.01	22.8±0.01	32.1±0.01
луска	27.2±0.01	55.5±0.01	12.2±0.01	32.3±0.01

				Продовження таблиці 1
кістки	41.0±0.01	41.7±0.01	9.51±0.01	24.4±0.01
шкура	24.5±0.01	18.8±0.01	1.7±0.01	5.1±0.01
Сазан				
голови	36.4±0.01	40.7±0.01	17.6±0.01	39.4±0.01
луска	27.3±0.01	56.13±0.01	10.7±0.01	32.65±0.01
кістки	42.0±0.01	39.5±0.01	9.1±0.01	4.5±0.01
шкура	27.5±0.01	18.8±0.01	1.1±0.01	8.5±0.01
Товстолобик				
голови	35.1±0.01	44.8±0.01	21.4±0.01	30.1±0.01
луска	28.1±0.01	55.7±0.01	11.7±0.01	30.24±0.01
кістки	40.0±0.01	40.4±0.01	9.6±0.01	24.7±0.01
шкура	23.5±0.01	17.8±0.01	1.2±0.01	5.1±0.01
Карась				
голови	36.2±0.01	42.8±0.01	18.7±0.01	37.9±0.01
луска	37.8±0.01	42.5±0.01	0.2±0.01	25.8±0.01
кістки	40.1±0.01	47.4±0.01	11.2±0.01	44.3±0.01
шкура	25.1±0.01	19.2±0.01	2.3±0.01	5.4±0.01

Данні табл. 1 також показали, що в різних видів риб достатньо близькі показники за хімічним складом ВРС – вмістом жиру, білкових та мінеральних речовин. Це дозволяє вважати хімічний склад луски риб відносно постійним, що виступає важливим фактором у виробництві колагенового препарату та кулінарних виробів з його введенням.

Однак найбільший середній вміст білкових речовин спостерігається у вторинній сировині,

яка отримана з сардини, сардинелли та коропа. Тому саме ці види риби були взяті для подальшого детального аналізу їх хімічного складу.

Порівняльна оцінка амінокислотного складу луски (таблиця 2) океанічних (на прикладі сардини і сардинелли) і регіональних (на прикладі коропа) видів риб показала, що луску риб можна вважати джерелом практично всіх незамінних і цінних замісних амінокислот.

Table 2

Amino acid composition of sardine, sardinella and carp scales proteins (n=5, P=0.95)

Таблиця 2

Амінокислотний склад білків луски сардини, сардинелли і коропа (n=5, P=0.95)

Назва АК	Середня масова частка в сухій лусці					
	Сардини		Сардинелли		Короп	
	г / 100 г білка	г / 100 г луски	г / 100 г білка	г / 100 г луски	г / 100 г білка	г / 100 г луски
аланін	5.84	3.31	11.20	5.60	9.96	6.84
аргінін	7.23	4.10	7.90	4.00	4.33	2.98
аспарагін	0.00	0.00	0.10	0.10	1.30	0.89
аспарагінова кислота	6.05	3.43	4.90	2.50	7.79	5.36
цистін	0.21	0.12	0.00	0.00	0.87	0.60
глутамін	0.04	0.02	0.80	0.40	1.30	0.89
глутаминова кислота	9.29	5.27	8.50	4.30	6.93	4.76
гліцин	12.57	7.13	26.00	13.1	29.44	20.23
гістидин	1.66	0.94	1.20	0.60	2.16	1.49
гідроксипролін	9.45	4.79	10.70	4.40	7.84	5.39
лейцин	3.65	2.07	2.70	1.30	1.73	1.19
ізолейцин	2.12	1.21	1.00	0.50	0.01	0.01
лізин	2.72	1.54	4.00	2.00	2.16	1.49
метіонін	2.84	1.61	0.01	0.01	1.73	1.19
орнітин	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
феніланін	2.75	1.56	2.20	1.10	2.60	1.79
фосфоетаноламін	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.3
пролін	9.42	5.34	11.70	5.90	6.93	4.76
серін	4.00	2.27	2.90	1.50	9.09	6.25
таурин	0.10	0.06	0.00	0.00	2.16	1.49
треонін	1.22	1.69	2.10	1.10	2.60	1.79
тирозин	1.53	0.87	0.60	0.30	1.73	1.19
валін	2.05	1.16	1.50	0.80	0.43	0.3
Σ незамінних АК	17.35	10.84	13.5	6.8	11.25	7.75

За ідентичного набору амінокислот луска риби має незначні відмінності в умісті окремих амінокислот. Основними амінокислотами луски є (% маси азотної частини): гліцин (12.57–29.44 %), аланін (5.84–11.20 %), глутамінова кислота (6.93–9.29 %), пролін (6.93–9.42 %) і гідроксипролін (4.33–10.70 %), що узгоджується з літературними даними. Саме ці амінокислоти необхідні людям, які мають фізичні навантаження та для профілактики і підтримки опорно-рухового апарату організму.

Аналітичне визначення сполучно-

тканинних білків луски, показало, що на сумарний вміст колагену і еластину доводиться 76.3 % в білках сардини, 86.4 % в білках сардинелли і 63.3 % в білках коропа. Різниця в кількостях сполучно-тканинних білків може бути пояснена видовою специфічністю.

Відомо, що білок луски не повноцінний за якісно-кількісним складом амінокислот (щодо білка «еталона» ФАО/ВООЗ), що підтверджується дослідженнями та оцінкою біологічної цінності (БЦ) білків луски досліджуваних видів риби (таблиця 3).

Table 3

Biological value of proteins in sardine, sardinella and carp scales

Таблиця 3

Біологічна цінність білків луски сардини, сардинелли та коропа

Незамінні АК	Вміст АК в білка «еталона» ФАО/ВООЗ, г / 100 г	Луска сардини		Луска сардинелли		Луска коропа	
		вміст АК, г / 100 г білка	АК скор,%	вміст АК, г / 100 г білка	АК скор,%	вміст АК, г / 100 г білка	АК скор,%
ізолейцин	4	2.12	53	1	25	0,01	25
лейцин	7	3.65	52.143	2.7	38.571	1.73	17
лізин	5.4	2.72	50.37	4	74.074	2.16	27.593
валін	5	2.05	41	1.5	30	0.43	8.6
метіонін + цистин	3.5	2.84	81.143	0	0	1.73	49.429
треонін	4	1.22	30.5	2.1	52.5	2.6	65
триптофан	1	0.53	53	0.73	73	0.72	72
фенілаланін + тирозин	6	2.75	45.833	2.2	36.667	2.6	43.333
сума:	36.0		17.35		13.50		10.21

Наведені в таблиці 3 значення показників доводять достатньо високу БЦ білків луски сардини (79.9 %), сардинелли (62.8 %) та коропа (81.2). Однак амінокислоти (АК) скорі для всіх незамінних АК нижче 100 % (8.60–81.14 %), що недостатньо для проектування повноцінної БАР колагенової природи для виробництва кулінарної продукції. Даний недолік кількісно відображений в значеннях коефіцієнту розбалансованості амінокислотного складу (КРАС) (20.1–44.5 %) і коефіцієнта утилітарності амінокислотного

складу (0.2–0.4).

Важливе значення для проектування кулінарної продукції мають якісний і кількісний склад мінеральної фракції. В таблиці 4 представлена порівняльна оцінка мінерального складу луски досліджуваних видів риби. Отримані дані свідчать, що мінеральна фракція луски за вмістом функціональних мінеральних речовин і раціональності переведення мінерального біопотенціалу луски може бути переведена у засвоювану форму.

Table 4

Mineral composition of sardine, sardinella and carp scales

Таблиця 4

Мінеральний склад луски сардини, сардинелли і коропа

Найменування мікро / макроелементів	Середня масова частка в сухій лусці, мг / 100 г луски		
	Сардини	Сардинелли	Короп
фтор	2.6	2.12	2.01
хлор	23.2	12.44	10.38
сірка	354	340.8	315.9
цинк	8.64	9.7	9.8
залізо	19.2	16.8	13.8
кальцій	16700	16750	16800

			Продовження таблиці 4
калій	118.5	85.8	78.2
магній	277	280.1	268.3
натрій	302.7	232.3	238.0
фосфор	7987	7860	7900

Таблиця 4 демонструє досить близький вміст в лусці різних видів риб певних функціональних мікро- та макроелементів, важливих для сучасної людини. Луска всіх досліджуваних видів риб є найбагатшим джерелом переважно таких макроелементів, як кальцій та фосфор. Перший елемент є основним пластичним матеріалом для скелета, другий – незамінним складовим компонентом молекули АТФ і креатинфосфату. Дані макроелементи знаходяться в органічно зв'язаному стані в вигляді солей $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ у співвідношенні близькому до $\text{Ca} : \text{P} = 2 : 1$. Саме таке співвідношення забезпечує найповніше їх засвоєння організмом і запобігає втраті цих мінералів.

Меншою мірою, але в відносно достатній кількості в лусці міститься сірка, калій і магній – важливі біологічно активні компоненти, що впливають на метаболізм ферментних білків, амінокислот, мінеральних речовин, синтез колагена, а також сприяють поліпшенню нервово-м'язової передачі і нормалізації діяльності серцево-судинної і нервової систем

[9–12].

Встановлено, що продукти з низьким вмістом жиру і високим вмістом кальцію сприяють редукції більшої кількості жиру в організмі, ніж жировмісні вироби без кальцію. Механізм протікає за відповідною схемою: кальцій регулює виробництво 1,25-дигідроксिवітаміну D, який регулює в жирових клітинах внутрішньоклітинний рівень кальцію. Підвищена доступність у крові кальцію знижує вироблення 1,25-дигідроксिवітаміну D і сприяє ефективному «спалюванню» жиру. Ця закономірність використовується в виробництві продуктів для спортивного харчування в ході проектування так званих «жироспалювачів», важливих для коригування загальної маси і формування заданої м'язової маси спортсменів.

У таблиці 5 представлені результати дослідження якісного і кількісного складів жирних кислот ліпідів луски сардини, сардинелли і коропа.

Table 4

Fatty acid composition of fish scale lipids

Таблиця 5

Жирнокислотний склад ліпідів луски риб

Fatty acid composition of lipids in fish scales найменування жирної кислоти (ЖК)	Середня масова частка, % від суми жирних кислот луски		
	Сардинелли	Сардини	Короп
10:0 Капринова	-	4.8	4.1
12:0 Лауринова	-	14.6	10.2
14:0 Міристинова	18.78	0.9	11.2
16:0 Пальмітинова	34.80	34.9	32.4
16:1 цис-9-пальмітоолеїнова	14.78	9.5	12.2
18:0 Стеаринова	4.99	7.5	5.6
18:1 цис-9-Олеїнова	14.05	13.4	14.07
18:1 Ізомер	4.24	-	2.1
18:2 цис-9,12-Линолева	0.61	4.3	2.5
18:3 цис-9,12,15-Ліноленова	-	3.6	2.4
20:1 цис-11-Ейкозенова	2.02	-	-
20:5 цис-5,8,11,14,17-Ейкозапентаєнова	5.75	1.0	0.67
22:6 цис-4,7,10,13,16,19-Докозагексаєнова	-	1.7	-

З даних таблиці 5 видно, що луска риб містить ліпіди з досить високими показниками біологічної ефективності. В лусці присутні поліненасичені жирні кислоти ω -3 ряду – ейкозапентаєнова (5.75–1.0 %) і докозагексаєнова (в сардині 1.7 %) жирні кислоти, достатньо багаті на мононенасичені жирні кислоти за рахунок цінних олеїнової та

пальмітолеїнової жирних кислот. Останні застосовуються в спортивному харчуванні в складі «жироспалюючих» препаратів, для збільшення м'язової маси тіла, підвищення імунітету і уповільнення розвитку захворювань серцево-судинної системи.

Результати та їх обговорення

Колаген у вторинній рибній сировині

міститься у важкодоступній і практично незасвоюваній травними ферментами організму людини формі в силу специфічності будови нативних тканин сировини і відносно високої молекулярної маси колагенових фібрил. Ефективний спосіб

підвищення засвоюваності колагенових протеїнів – це гідролітична деструкція білкових молекул до пептидів і амінокислот [14, 15].

Для визначення змін зв'язків в ВРС провели ІЧ-спектроскопію.

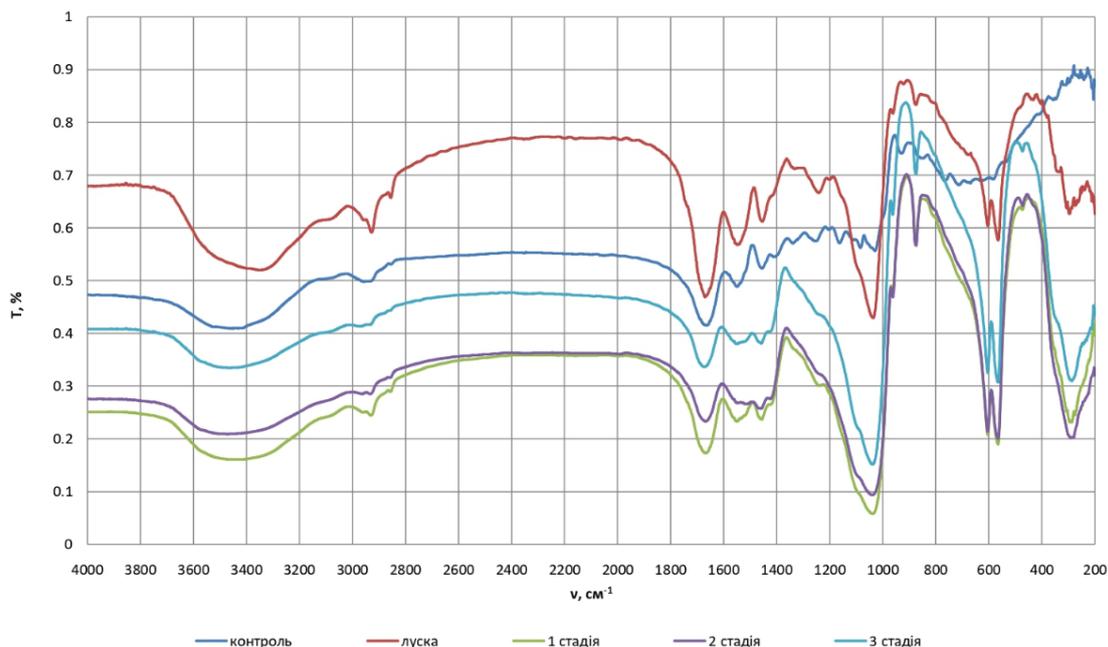


Fig. 1. IR spectra of the obtained collagen preparation
Рис. 1. ІЧ-спектри отриманого колагенового препарату

Аналіз отриманих ІЧ-спектрів (рис. 1) отриманого колагенового препарату показав наявність піку за 3500 cm^{-1} , що свідчить про те, що отриманий зразок є продуктом гідролізу колагену (амід А).

Наявність валентних коливань $\text{C}=\text{I}$ груп неіонізованих і іонізованих кислот характеризує смуга поглинання за 1620 cm^{-1} .

В спектрі колагенового препарату спостерігається інтенсивна широка смуга з максимумом поглинання за 3400 cm^{-1} , яка зміщена в низькочастотну область порівняно з частотою вільних груп OH , що свідчить про наявність гідроксилів у системі водневих зв'язків.

Відсутність смуги поглинання за 3650 cm^{-1} вказує, що практично всі гідроксильні групи включені в водневий зв'язок. Наявність піків при 600 cm^{-1} і 1050 cm^{-1} характеризує валентні коливання структурного скелета молекули і показують на те, що гідроліз пройшов не в повній мірі.

Отримані дані за допомогою ІЧ-спектроскопії підтверджуються дослідженнями [16] та показали наявність вільних груп, що зумовлено високим вмістом амінокислот з великою кількістю

внутрішньо і зовнішньоміжланцюжних зв'язків (водородні зв'язки, діполь-діпольні зв'язки, іонні зв'язки, взаємодія Ван дер Ваальса), здатних до комплексоутворення. Отриманий колаген володіє властивостями, що типові для колагену I типу, складається з двох ланцюгів $\alpha 1$ і одного ланцюга $\alpha 2$, що також підтверджується дослідженнями [17-19].

Гідролізат колагену було отримано з вторинної рибної сировини, а саме з луски коропа, шляхом двостадійної лужної обробки. Технологічна схема отримання колагенового препарату складається з трьох основних стадій:

Стадія А (підготовча). Луску, яку відділили від риби, подають за допомогою ящикоперекидача в ванну. Луску за допомогою стрічкового конвеєра подають на промивання від непотрібних залишків у ванну з мішалкою, витрати води на миття складають $1\text{ m}^3/1\text{ т}$ сировини. Потім сировину підсушують у сушильній шафі 5 хв. За необхідності зберігання луску заморожують та зберігають не більш ніж 24 год. Перед подальшою обробкою заморожену луску розморожують за

температури 0–4 °C протягом 3 год.

Стадія Б. Підготовлену луску подають у ванну для знежирювання, де обробляють 4 %-им розчином NaOH, за ГМ = 1 : 3 та температурі 4 ± 2 °C протягом 24 год. Знежирену луску промивають у ванні проточною водою.

Гідроліз луски здійснюють шляхом двократної обробки: спочатку промивають знежирену луску водою, а потім заливають 6 %-им розчином NaOH за ГМ = 1 : 3 та температурі 4 ± 2 °C та витримують у ванні протягом 24 год. Далі промивають проточною водою в ванні та заливають 7 %-им розчином NaOH та витримують 12 год за температури 20 ± 2 °C.

Зміна білкових конгломератів на колагенвмісній сировині показала, що вони мають еліпсоїдну форму та нерівномірно розташовані по всій пластині луски [14]. Після гідролізу їхній розмір зменшується в середньому в 2–2.5 рази та вони набувають округлої форми. Дослідження зміни молекулярно-масового складу білкових компонентів показав, що під час лужної обробки збільшується частка низькомолекулярних білкових складових (середня молекулярна маса становить 30.7 кДа) до 56 % від загальної кількості [14].

Під час лужної обробки створюється таке середовище, в якому амінокислоти існують у вигляді цвітер-іонів, тобто в стані хімічної

рівноваги. Після обробки луски 6 та 7 %-ими розчинами лугу створюється середовище, в якому цвітер-іони стабілізуються за рахунок водневих зв'язків з молекулами води. Про це свідчать результати ІЧ-спектроскопії, а саме відсутність смуги поглинання за 3650 cm^{-1} (рис. 1).

Розчин декантують, а отриманий таким чином осад гідролізату колагену промивають водою та заливають 2 %-им розчином оцтової кислоти, витримують 8 хв для повної нейтралізації лугу. Розчин декантують та отримують осад.

Стадія В. Отриманий осад промивають водою за $t = 15\text{--}17$ °C. Для нейтралізації лугу використовують 2 % розчин оцтової кислоти, яким обробляють осад протягом 7–8 хв і потім промивають водою до досягнення змивних вод $\text{pH} = 7.0$.

Готовий гідролізат колагену в барабанній сушильній машині висушують за температури 70 ± 5 °C до досягнення ним масової частки вологи 6.5–7.0 %. Далі, за допомогою стрічкового конвеєра, подають отриманий сухий гідролізат колагену на подрібнення в дробарку.

Отриманий порошок подрібнюють та фасують. Розрахунок матеріального балансу в виробництві гідролізату колагену наведено в таблиці 6.

Table 6

Таблиця 6

Material balance in the production of collagen hydrolysate

Матеріальний баланс у виробництві гідролізату колагену

Технологічна операція	Сировина, кг/год
Поступило на промивання	100
Витрати й відходи, %	0.5
кг	0.5
Поступило на знежирення	99.5
Витрати й відходи, %	7
кг	6.9
Поступило на промивання	92.6
Витрати й відходи, %	0.5
кг	0.46
Поступило на лужний гідроліз	92.14
Витрати й відходи, %	7
кг	6.4
Поступило на промивання	85.74
Витрати й відходи, %	0.5
кг	0.42
Поступило на гідроліз	85.32
Витрати й відходи, %	5
кг	4.2
Поступило на декантацію	81.12
Витрати й відходи, %	18
кг	14.6

Продовження таблиці 6	
Поступило на промивання Витрати й відходи, %	66.52
кг	0.5
	0.3
Поступило на обробку CH_3COOH	66.22
Витрати й відходи, %	5
кг	3.3
Поступило на промивання Витрати й відходи, %	62.92
кг	0.5
	0.3
Поступило на подрібнення Витрати, й відходи, %	62.61
кг	0.5
	0.3
Надходить на виробництво, кг	62.3

Гідролізат колагену має білий колір, не має запаху та присмаку, що може дозволити його використання в якості біологічно активної добавки до різних харчових продуктів. Отриманий гідролізат колагену можна використовувати в виробництві желатини, для освітлення вин, для здобуття харчових плівок, покриттів, їстівних оболонки, як структуроутворювач в заливках для консервів і рибних фаршів, формованих рибних виробів, у виробництві штучної ікри, бульйонів, холодців, соусів, різних оздоровчих напоїв і коктейлів, і як добавки в

хлібопекарському і кондитерському виробництвах.

Седиментаційний аналіз полідисперсної системи. Для визначення якісних характеристик мікроструктури гідролізат колагену за фракційним складом був проведений седиментаційний аналіз дисперсності (табл. 7). Результати наведено в вигляді кривої седиментації (рис. 2), яка дає уявлення про динаміку осідання частинок та седиментаційну стійкість полікомпонентної системи.

Table 7

Experimental data for constructing a sedimentation curve

Таблиця 7

Експериментальні дані для побудови седиментаційної кривої

Час осідання, сек.	Показання терезів $m_{\text{вим.}}$, мг	$m = m_{\text{вим.}} - m_0$, мг	Q_i , %
60	158.25	118.25	88.577
120	165.00	125.00	93.633
180	170.25	130.25	97.566
240	172.25	132.25	99.064
300	173.50	133.50	100
360	173.50	133.50	100
420	173.50	133.50	100

З рис. 2 видно, що колоїдна система гідролізату коллагена характеризується достатньо високим ступенем седиментаційної стійкості – спостерігається поступове осідання частинок дисперсної фази, що свідчить про стабільну та однорідну водну систему гідролізату колагену. Колоїдна система, утворена за допомогою гідролізату колагену (дисперсна фаза – частинки ГК, дисперсне середовище – вода) характеризуються різним ступенем седиментаційної стійкості. Характерне для гідролізату колагену поступове осідання частинок дисперсної фази

сприятиме утворенню більш стабільної та однорідної системи після відновлення полярним розчинником (в процесі приготування кулінарної продукції).

Для побудови диференційної кривої розподілу частинок за радіусами використовували «метод дотичних». Результати обробки кривої седиментації наведені в табл. 8.

Таким чином виявлено, що найімовірніший радіус частинок ГК становить $1070 \cdot 10^{-6}$ м. Відсоток частинок за мінімальним розміром становить 63.96 %, за максимальним – 2.42 %.

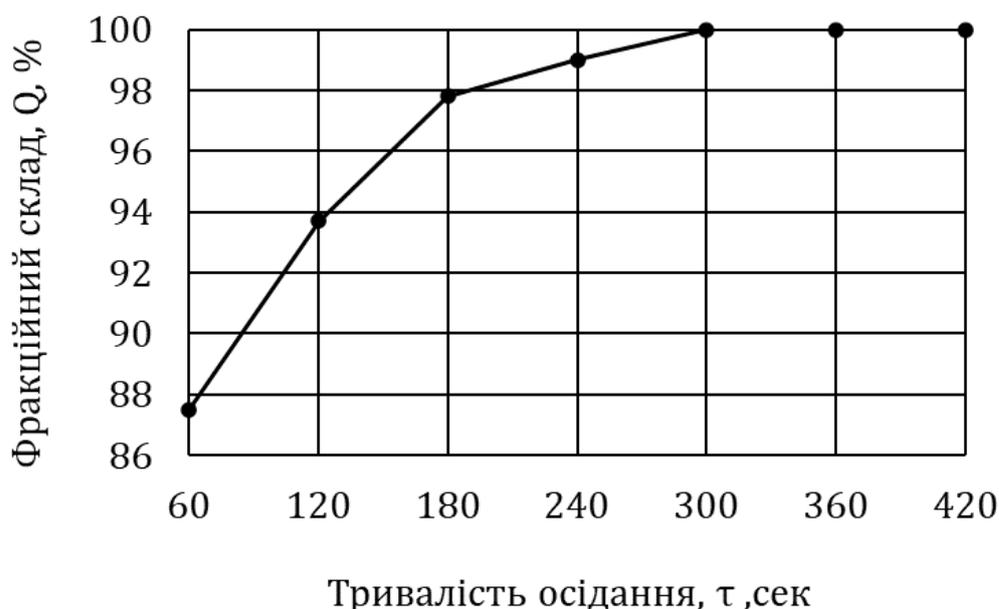


Fig. 2. Sedimentation curve of the polydisperse HA system
Рис. 2. Седиментаційна крива полідисперсної системи ГК

Experimental and calculated data for constructing distribution curves

Table 8

Таблиця 8

Експериментальні та розрахункові дані для побудови кривих розподілу

Час осідання, сек	Радіус частинок, $r \cdot 10^{-6}$, м	Фракційний склад, Q, %	Δr_i , м	ΔQ_i , %	F_i , m^{-1}
60	1500	88.577	931	11.423	0.0123
120	1070	93.633	501	6.367	0.0127
180	870	97.566	301	2.434	0.0081
240	754	99.064	185	0.936	0.0051
300	674	100	105	0	0
360	615	100	46	0	0
420	569	100	0	0	0

Дослідження водо-, жирутримуючої здатності та гідратаційних властивостей гідролізату колагена. Дані, отримані за допомогою ІЧ-спектроскопії, показали наявність вільних груп, здатних зв'язувати молекули води. Тому є цікавим визначення впливу технологічних параметрів на водо- та жирутримуючу здатність, а також гідратаційні властивості (здатність до набухання) гідролізату колагену для прогнозування його поведінки в рідких харчових системах.

Результати дослідження водо- та жирутримуючої здатності отриманого ГК наведені на рис. 3, 4

Отримані дані (рис. 3) показали, що найбільше утримання вологи відбувається в кислому середовищі (рН=2.3), а найменше – в лужному. Водночас максимальна водоутримуюча здатність (ВУЗ) ГК досягається за температури 50 °С і становить 22 %. Збільшення температури рідкої фази до

60 °С призводить до зменшення ВУЗ на 4.55 % відносно максимального значення. Також динаміка зміни значення ВУЗ спостерігається і за рН=7.0, 10.1, що може бути пов'язано з термічним гідролізом з утворенням глютину за умови збільшення температури.

Жирутримуючу здатність (ЖУЗ) ГК визначали, змінюючи температуру жирової фази з 10 до 70 °С та використовували найбільш розповсюджені види жиру, що використовуються під час виробництва широкого спектру кулінарної продукції (рис. 4). Жирутримуюча здатність ГК (рис. 4) збільшується зі збільшенням температури середовища і досягає максимального значення за температури 70 °С і становить для масла кунжутного – 7.1 %, для масла волоського горіха – 7.5 %, для масла вершкового – 5.8 %. Отримані дані корелюють з даними отриманими в [16], що показали зниження стабільності емульсії пептидних фракцій при низькій молекулярній масі.

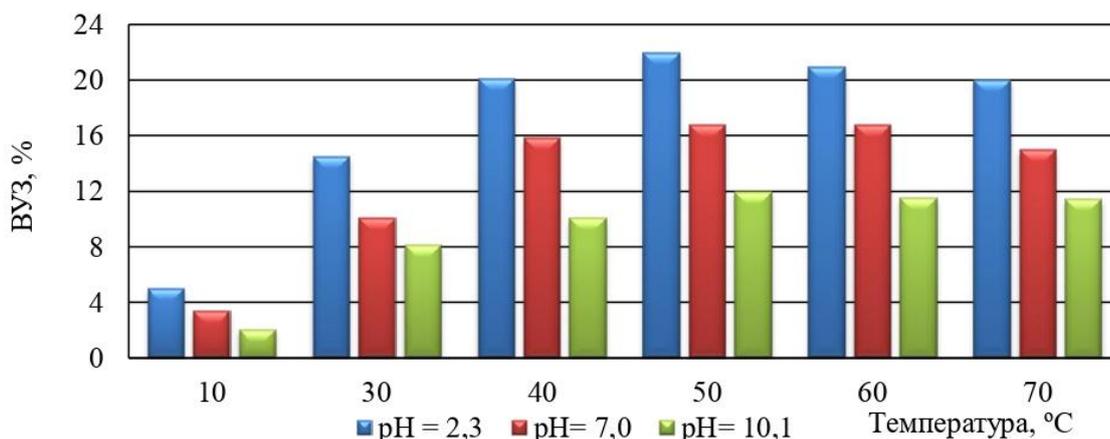


Fig. 3. Dynamics of changes in the water-holding capacity of HA depending on temperature
Рис. 3. Динаміка зміни водоутримуючої здатності ГК в залежності від температури

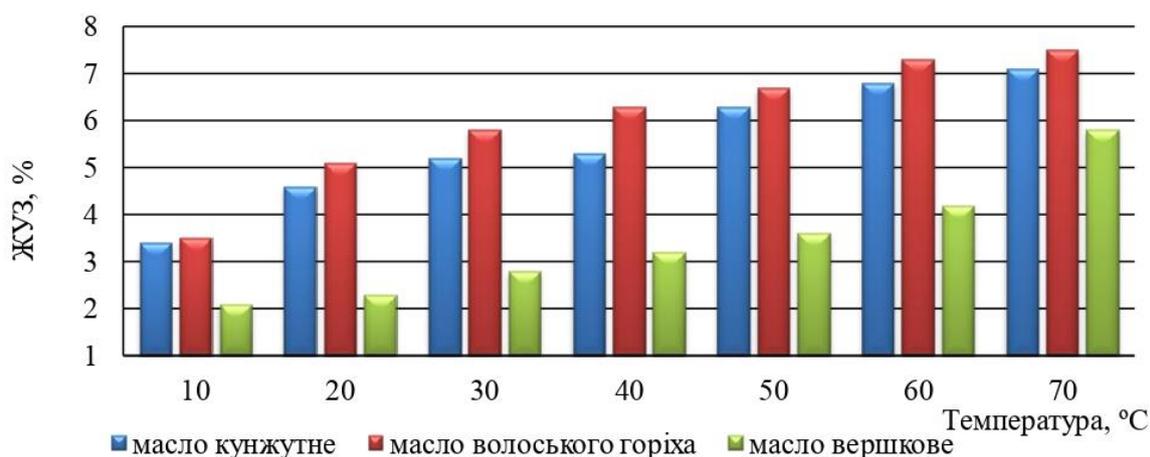


Fig. 4. Dynamics of changes in the fat-retaining capacity of HA depending on temperature
Рис. 4. Динаміка зміни жирутримуючої здатності ГК в залежності від температури

Таким чином, можна стверджувати, що ГК як складний білок має ізоелектричну точку в лужному середовищі.

Зменшення рН призводить до дисоціації основних (NH⁻) і кислотних груп (COOH⁻) білка, збільшення заряду білкової молекули ГК і збільшенні її гідратації. Гідратна (водна) оболонка надає стійкість розчину ГК, заважає окремим частинкам злипатися і випадати в осад – навколо них утворюються гідратні оболонки, які оберігають білкові молекули від склеювання і випадання в осад.

Визначення впливу температури на ступінь набухання за різних значень рН також показало, що температура істотно визначає тенденцію гідратації. За всіх обраних значеннях рН і температурі 60 °C відбувається незначне набухання ГК. Так, за рН = 2.3 воно становить 198 %, за рН = 7.0 – 151 %, за рН = 10.1 – 110 % через 1.5 год. За зниження температури значення набухання значно

зростає. Так, за 20 °C ГК поступово набухає і досягає найбільшого ступеня набухання (305 %), який спостерігається за рН = 2.3 через 3 год. За рН = 10.1 і температурі 60 °C відбувається деструкція ГК і утворення желатину [17].

Дослідження показали, що за збільшення температури ступінь гідратації ГК збільшується, а потім зменшується. Так, за температури 60 °C максимальне значення ступеня набухання досягається на 2-гу годину інкубування, за температур 40 °C і 50 °C на 3-тю годину інкубування (195 % і 204 % відповідно), а за 20 °C ступінь набухання досягає максимуму 220 % через 3 год інкубування. Подальше інкубування ГК призводить до зниження ступеня набухання.

Кристалічна форма, яка не була зруйнована лужним гідролізом під час гідратації, частково розчиняється. Частинки ГК набувають більш м'якої і рихлої

структури, за рахунок чого утворюються пори в частинках, які можуть відігравати важливу роль у процесі сорбції і виведення з організму людини важких металів і токсичних речовин, тощо. Для визначення

часу початку розчинення ГК були проведені дослідження по накопиченню сухих речовин та зміни в'язкості декантанту під час набухання ГК (рис. 5).

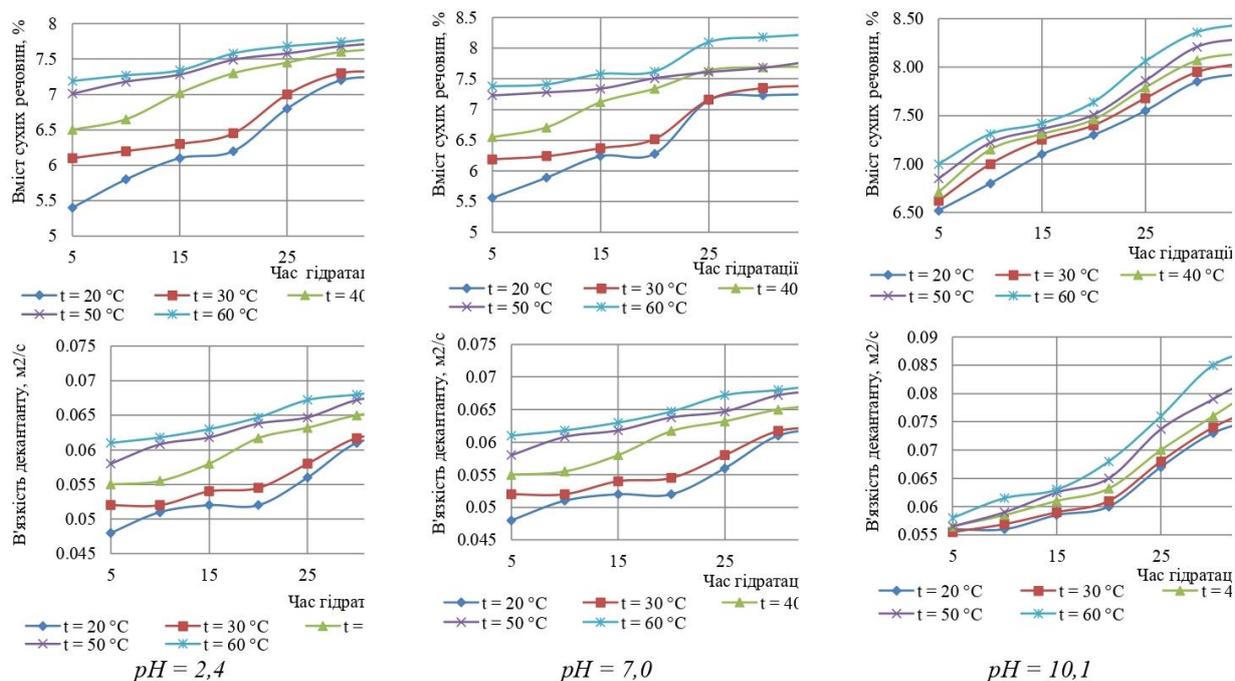


Fig. 5. Dynamics of changes in the content of solids and viscosity of the liquid phase during the swelling of HA
Рис. 5. Динаміка зміни вмісту сухих речовин та в'язкості рідкої фази впродовж набухання ГК

Дослідження комплексоутворення між гідролізатом колагену та гідролітичними ферментами. Під час іммобілізації біорегуляторів білкової природи (ферментів) використовували вище перераховані методи для концентрування, стабілізації та одержання БАД, яка містить гідролітичний фермент – α -амілазу. Досліджували стабільність ферменту, що особливо важливо коли мова йде про нутрицевтики, які здійснюють амілолітичну функцію в умовах середовища шлунково-кишкового тракту. Розробка та конструювання поліфункціональних БАД для людей з порушеною ферментативною активністю є актуальною задачею, яка дозволить розширити асортимент сучасних БАД та кулінарних виробів профілактичного харчування, підвищить їх харчову та біологічну цінність, дасть можливість раціонально використовувати нативні компоненти сировини.

Іммобілізацію амілази проводили на ГК з метою одержання БАД, що має вищу рН-стабільність та термостабільність, ніж нативний фермент. Утворення зв'язків між носієм та ферментом змінює кінетичні

характеристики ферментативної реакції, що дозволяє впливати на перебіг реакцій в шлунково-кишковому тракті. Іммобілізація амілази здійснюється шляхом фізичної адсорбції на матриці включенням до гелю ГК, а також ковалентним зв'язуванням ферменту з нерозчинним матеріалом з утворенням нерозчинних полікомпонентних комплексів. Оскільки ГК має високу гідрофільну здатність, то фермент легко зв'язується з ним. Фермент та матриця є речовинами білкової природи, тому в результаті іммобілізації вони утворюють міцні електростатичні зв'язки та зв'язки, які можна визначити за допомогою ІЧ-спектроскопії. Поглинання в ІЧ-області обумовлено переходами між коливальними рівнями енергії, що відповідають різним функціональним групам.

Отримані графіки ІЧ-спектрів (рис. 1) дозволили провести порівняння зв'язків в нативному ферменті. Данні аналізу отриманих ІЧ-спектрів свідчать про ускладнення будови молекули після включення в гель порівняно з механічною іммобілізацією, та служать підтвердженням гіпотези про те, що функціональні групи в складі ГК здатні до утворення зв'язків з ферментами. Це дає

можливість рекомендувати ГК в якості матриці для іммобілізації ферментів з метою створення БАД спрямованої дії.

Для підтвердження ефективності використання ГК у якості матриці, що забезпечує стабільність ферментів, була визначена термостабільність та рН-стабільність іммобілізованого ферменту в порівнянні з нативним ферментом.

Данні визначення термостабільності іммобілізованої амілази показали досить високий показник стабільності (Рис. 6). Так, фермент проявив високу термостабільність – за 6 год інкубування за 20 °С активність іммобілізованого ферменту знижується лише на 0.4 %, за 37 °С знижується на 2.8 %, за 45 °С – 7 %, за 65 °С – 15.2 %.

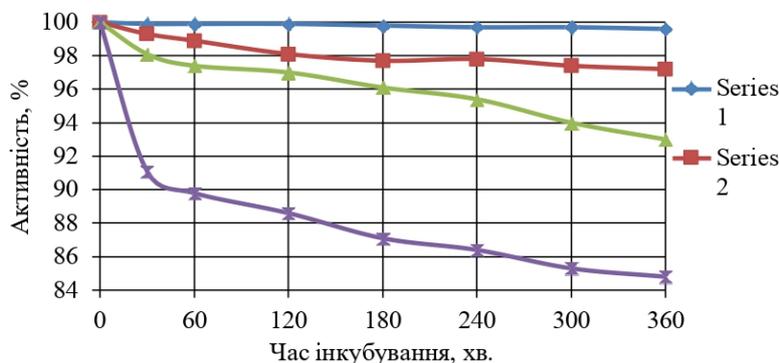


Fig. 6. Thermal stability: row 1 – 37 °С, row 2 – 45 °С, row 3 – 65 °С, row 4 – 20 °С.
Рис. 6. Термостабільність: ряд 1 – 37 °С, ряд 2 – 45 °С, ряд 3 – 65 °С, ряд 4 – 20 °С.

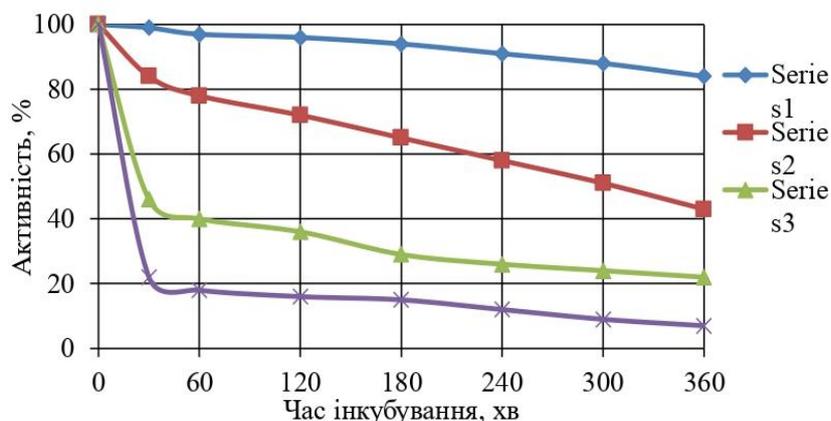


Fig. 7. pH stability of immobilized amylase: row 1 – pH = 5, row 2 – pH = 7, row 3 – pH = 9, row 4 – pH = 2
Рис. 7. рН-стабільність амілази іммобілізованої: ряд 1 – рН = 5, ряд 2 – рН = 7, ряд 3 – рН = 9, ряд 4 – рН = 2

Як видно з рис. 7, рН-стабільність іммобілізованого ферменту теж є більшою, ніж у контрольного зразка амілази, оскільки через 6 год інкубації за рН 5.0 його активність зменшилась на 3 %. За рН 2.0 активність знижується протягом 30 хв на 25 %.

Значне підвищення термостабільності та рН-стабільності іммобілізованого ферменту в порівнянні з контрольним зразком дає можливість широко використовувати комплекс ГК-амілаза в харчовій промисловості.

Фармакологічна оцінка ГК. Аналіз кінетики процесу ферментативного гідролізу показав, що гідроліз відбувається практично з постійною швидкістю. Так, за 8 год інкубації, що зіставне з реальними умовами

перетравлювання їжі в організмі людини, гідролізат колагену перетравлюється на 66.4 %.

Фармакологічні дослідження ГК проводили в лабораторії біохімічної фармакології ДП «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт») м. Одеса. Фармакологічні дослідження проведено на 20 білих лабораторних щурах (самках) лінії Вістар, віком 2.5 місяці, середньою масою 152.6 г на початок експерименту. Тварини містилися у стандартних умовах віварію, корм отримували ad libitum.

Тварин поділили на 3 групи: I – стандартний комбікорм віварію, 6 тварин; II –

раціон, дефіцитний за білком та кальцієм, 7 тварин; III – раціон, дефіцитний за білком та кальцієм, + гідролізат колагену 2 % від маси корму, 7 тварин. Склад раціону, дефіцитного по білку та кальцію: кукурудза – 68.9 %, буряк – 20.7 %, капуста – 10.4 %.

Добавка гідролізату колагену до дефіцитного раціону в третій групі достовірно підвищила щільність всіх кісток у щурів цієї групи порівняно з показниками в 2-й групі ($p_1 < 0.001$) та в інтактній групі ($p < 0.01$): на 7.44 та 3.59 % для стегнових кісток і на 9.42 і 3.88 % – для поперекових хребців відповідно (рис. 8).

Добавка гідролізату також сприяла збільшенню маси та об'єму кісток у цій групі, до того ж дані показники чисельно перевищували аналогічні значення в інтактній групі: за масою – на 5.1 та 5.85 % для стегнових кісток та хребців, за об'ємом – на 1.70 і 2.27 % відповідно. Збільшення маси та обсягу кісток після додавання гідролізату порівняно з показниками у 2-й групі було достовірним ($p_1 < 0.01$) і склало за масою – 22.0 та 28.2 % для стегнових кісток та хребців, за обсягом – 13.6 і 17.0 % відповідно (рис. 8).

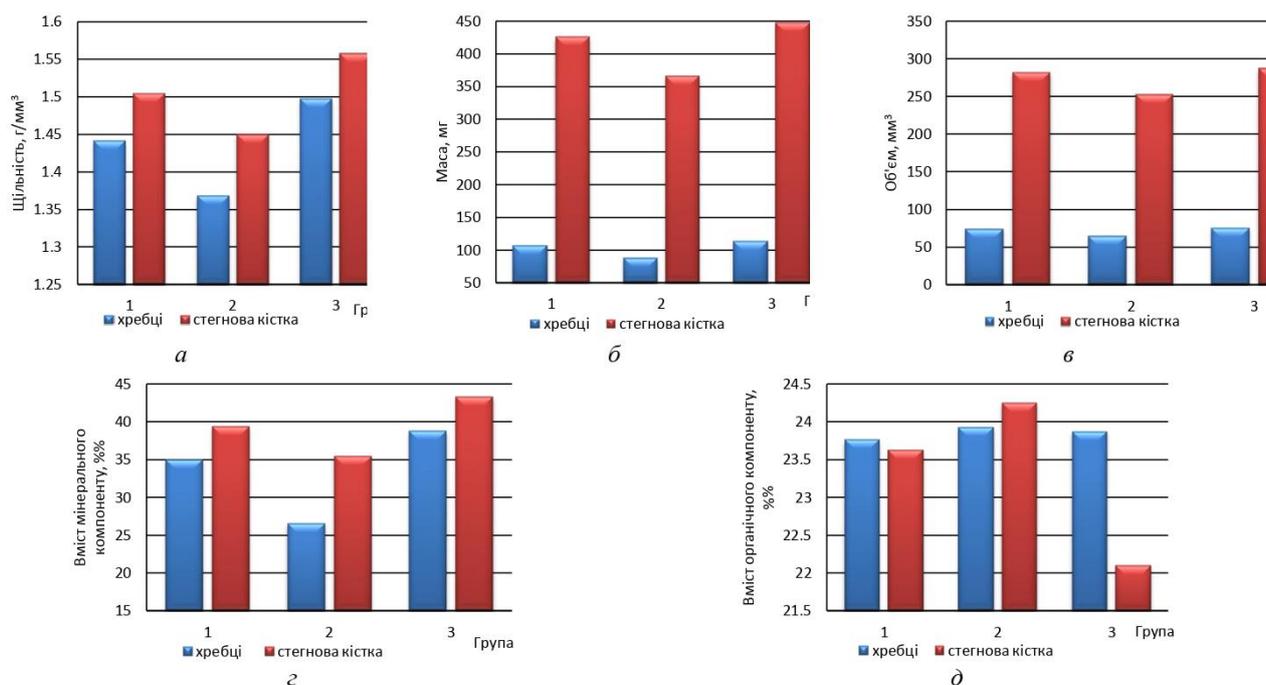


Fig. 8. Morphometric parameters of the condition of femurs and lumbar bones (1 – group of animals, 2 – second group of animals, 3 – third group of animals – density; b – mass; c – volume; d – content of mineral component; e – content of organic component)

Рис. 8. Морфометричні параметри стану стегнових кісток і кісток попереку (1 – група тварин, 2 – друга група тварин, 3 – третя група тварин; а – щільність; б – маса; в – об'єм; г – вміст мінерального компоненту; д – вміст органічного компоненту)

Таким чином, гідролізат колагену частково компенсував дефіцит білку в раціоні, сприяючи розвитку внутрішніх органів щурів і відновлюючи транспорт тригліцеридів; виявив імуностимулюючу і гепатотропну дію, а також виражений остеотропний ефект на тлі тривалого вживання щурами дефіцитного за білком та кальцієм раціону, що корелює з дослідженнями [9; 12; 17; 20; 21]. Отриманий гідролізат колагену виявив антиоксидантні властивості, що підтверджується дослідженнями [16; 22–25]. Добавка даного компоненту до неповноцінного корму сприяла посиленню синтезу кісткової тканини, що виявилось в збільшенні маси та об'єму кісток і

значно підвищила рівень мінералізації кісток, за рахунок чого збільшилася їхня щільність.

Висновки

Порівняння хімічного складу вторинної рибної сировини показало, що найкращим джерелом для отримання гідролізату колагену є вторинна сировина, отримана з луски коропа.

Отримані результати демонструють, що найбільший рівень утримання вологи спостерігається в кислому середовищі (pH = 2.3), а в лужному середовищі цей показник суттєво знижується. Максимальна вологоутримуюча здатність гідроколоїду

досягається за температури 50 °C і складає 22 %. Підвищення температури рідкої фази до 60 °C призводить до зниження ВУЗ на 4.55 % відносно максимального значення. Подібна тенденція спостерігається і за рН = 7.0 та рН = 10.1, що може бути зумовлено термічним гідролізом гідроколоїду з утворенням глютину за підвищення температури. Також дослідження показали, що жируотримуюча здатність гідроколоїду збільшується зі зростанням температури доквілля. Максимальні значення ЖУЗ досягнуті за температури 70 °C: для кунжутної олії – 7.1 %, для волоського горіха – 7.5 %, а для вершкового масла – 5.8 %.

Встановлено, що найбільш ймовірний радіус частинок гідрогелю становить $1070 \cdot 10^{-6}$ м. Частка частинок з мінімальним розміром становить 63.96 %, тоді як з максимальним – лише 2.42 %. Аналіз отриманих ІЧ-спектрів свідчить про ускладнення молекулярної будови після включення ферменту в гель порівняно з механічною іммобілізацією. Це підтверджує гіпотезу про здатність функціональних груп у складі ГК утворювати зв'язки з ферментами. Такий результат дозволяє рекомендувати ГК як матрицю для іммобілізації ферментів у створенні біологічно активних добавок спрямованої дії. Для перевірки ефективності використання ГК як матриці, що забезпечує стабільність ферментів, було здійснено дослідження термостабільності та рН-стабільності іммобілізованого ферменту порівняно з нативним.

Для оцінки біологічної цінності отриманого гідролізату колагену з вторинної рибної сировини був проведений порівняльний аналіз білкової цінності луски сардини,

сардинели та коропа. Окрім того, досліджували мінеральний склад луски вказаних видів риб і жирнокислотний профіль їхніх ліпідів. У процесі роботи вивчили властивості отриманого гідролізату колагену. Результати досліджень показали, що гідролізат колагену частково компенсував недостатність білка в раціоні щурів, сприяючи розвитку їх внутрішніх органів, відновленню механізму транспорту тригліцеридів, а також проявив імуностимулюючий та гепатотропний ефекти. Особливо помітним став остеотропний вплив під час тривалого вживання дефіцитного на білок і кальцій раціону. Додавання цього компонента до незбалансованого корму сприяло активізації синтезу кісткової тканини, що проявилось в збільшенні маси та об'єму кісток і значному підвищенні рівня їх мінералізації, унаслідок чого збільшилася їхня щільність.

Таким чином, отримані дані показали, що вторинна рибна сировина може виступати цінним джерелом колагену, а отриманий шляхом лужного гідролізу гідролізат колагену має широкий спектр корисних властивостей. Проведені дослідження виявили в отриманому гідролізаті колагену високий біопотенціал, що дає можливість рекомендувати його як дієтичну добавку для людей, що мають захворювання суглобів та сполучних тканин, а також може виступати ефективною біоматрицею для іммобілізації ферментних препаратів. Фізичні властивості гідролізату колагену дають змогу рекомендувати його використання в якості технологічної добавки в виробництві ряду харчових продуктів та кулінарних виробів (з пінною та в'язкою системами).

References

- [1] Dzyuba, N. A., Oliinyk, M. I., Telezhenko, L. M., & Kolesnichenko, S. L. (2021). [The effect of biomodification on the change in the morphological structure of collagen-containing fish raw materials]. *Naukovi pratsi NUKhT*, 27(2), 198–206. (In Ukrainian).
- [2] Gaikwad, S., & Kim, M. J. (2024). Fish by-product collagen extraction using different methods and their application. *Marine Drugs*, 22(2), 60. <https://doi.org/10.3390/md22020060>
- [3] Koliada, M. K., & Plavan, V. P. (2019). [Rational use of secondary products of animal origin in accordance with the environmental legislation of Ukraine and the European Union]. *Ekolohichni nauky*, 3(26), 25–30. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-3-26-5>
- [4] Kushnir, N. A. (2014). [Determination of the balance of the amino acid composition of the collagen preparation]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli*, 1(19), 107–116. (In Ukrainian).
- [5] Nykyforov, R. P., Simakova, O. O., Slashcheva, A. V., Nazarenko, I. A., Horiainova, Y. A., & Popova, S. Y. (2019). [Scientific justification of the technology of the latest food products based on protein-carbohydrate milk and vegetable raw materials: a monograph]. DonNUET. (In Ukrainian).
- [6] Lastukhin, Y. O. (2009). *Kharchovi dobavky. E-kody. Budova. Oderzhannia. Vlastyvoli* [Food additives. E-codes. Structure. Production. Properties] (Y. O. Lastukhin, Ed.). Tsentr Yevropy.
- [7] Kushnir, N. A. (2009). [Technology of dietary supplements containing amyolytic enzyme inhibitors] [Doctoral dissertation abstract, ONAKhT].
- [8] Kuprina, E. E., Kiprushkina, E. I., Abramzon, V. V., Rogozina, E. A., Romanenko, N. Y., Mezenova, O. Y., Mörsel, T. (2023). Obtaining and study of peptide

- compositions based on hydrolysates of collagen-containing fish raw materials. *Fermentation*, 9(5), 458. <https://doi.org/10.3390/fermentation9050458>
- [9] Heffernan, S., Giblin, L., & O'Brien, N. (2021). Assessment of the biological activity of fish muscle protein hydrolysates using in vitro model systems. *Food Chemistry*, 359, 129852. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129852>
- [10] Al-Nimry, S., Dayah, A. A., Hasan, I., & Daghmash, R. (2021). Cosmetic, biomedical and pharmaceutical applications of fish gelatin/hydrolysates. *Marine Drugs*, 19(3), 145. <https://doi.org/10.3390/md19030145>
- [11] Nitsuwat, S., Zhang, P., Ng, K., & Fang, Z. (2021). Fish gelatin as an alternative to mammalian gelatin for food industry: A meta-analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 141, 110899. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110899>
- [12] Gaikwad, S. B., More, P. R., Sonawane, S. K., & Arya, S. S. (2021). Antioxidant and anti-hypertensive bioactive peptides from Indian mackerel fish waste. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 27(4), 2671-2684. <https://doi.org/10.1007/s10989-021-10282-0>
- [13] Rajabimashhadi, Z., Gallo, N., Salvatore, L., & Lionetto, F. (2023). Collagen derived from fish industry waste: Progresses and challenges. *Polymers*, 15(3), 544. <https://doi.org/10.3390/polym15030544>
- [14] Meng, D., Tanaka, H., Kobayashi, T., Hatayama, H., Zhang, X., Ura, K., Takagi, Y. (2019). The effect of alkaline pretreatment on the biochemical characteristics and fibril-forming abilities of types I and II collagen extracted from bester sturgeon by-products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 572-580. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.091>
- [15] Dong, Y., & Dai, Z. (2022). Physicochemical, structural and antioxidant properties of collagens from the swim bladder of four fish species. *Marine Drugs*, 20(9), 550. <https://doi.org/10.3390/md20090550>
- [16] González-Serrano, D. J., Hadidi, M., Varcheh, M., Jelyani, A. Z., Moreno, A., & Lorenzo, J. M. (2022). Bioactive peptide fractions from collagen hydrolysate of common carp fish byproduct: Antioxidant and functional properties. *Antioxidants*, 11(3), 509. <https://doi.org/10.3390/antiox11030509>
- [17] Jafari, H., Lista, A., Siekapen, M. M., Ghaffari-Bohlouli, P., Nie, L., Alimoradi, H., & Shavandi, A. (2020). Fish collagen: Extraction, characterization, and applications for biomaterials engineering. *Polymers*, 12(10), 2230. <https://doi.org/10.3390/polym12102230>
- [18] Van De Water, L., Varney, S., & Tomasek, J. J. (2023). Mechanoregulation of the myofibroblast in wound contraction, scarring, and fibrosis: Opportunities for new therapeutic intervention. *Advances in Wound Care*, 2(3), 122-141. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.03>
- [19] Jeevithan, E., Bao, B., Bu, Y., Zhou, Y., Zhao, Q., & Wu, W. (2014). Type II collagen and gelatin from silvertip shark (*Carcharhinus albimarginatus*) cartilage: Isolation, purification, physicochemical and antioxidant properties. *Marine Drugs*, 12(7), 3852-3873. <https://doi.org/10.3390/md12073852>
- [20] Xu, S., Zhao, Y., Song, W., Zhang, C., Wang, Q., Li, R., ... Sun, L. (2023). Improving the sustainability of processing by-products: Extraction and recent biological activities of collagen peptides. *Foods*, 12(10), 965. <https://doi.org/10.3390/foods12101965>
- [21] Tawalbeh, D., Kha'sim, M. I., Sarbon, N. M., & Sarbon, N. M. (2025). Techno-functional and bioactivity properties of collagen hydrolysate and peptide: A review. *Food Reviews International*. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2450052>
- [22] Abd Rashid, N. Y., Abdul Manan, M., Pa'ee, K. F., Saari, N., & Wong, F. W. F. (2022). Evaluation of antioxidant and antibacterial activities of fish protein hydrolysate produced from Malaysian fish sausage (Keropok Lekor) by-products by indigenous *Lactobacillus casei* fermentation. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131303>
- [23] Espinales, C., Romero-Peña, M., Calderon, G., Vergara, K., & Caceres, P. C. (2023). Collagen, protein hydrolysates and chitin from by-products of fish and shellfish: An overview. *Heliyon*, 9(4), e14937. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14937>
- [24] Jeyachandran, S., & Aman, M. (2025). Valorisation of fish scales and bones: A sustainable source of bioactive proteins and collagen for nutraceuticals. *Bioresources and Bioprocessing*, 12, 141. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00970-w>
- [25] Zaky, A. A., Simal-Gandara, J., Eun, J.-B., Shim, J.-H., & Abd El-Aty, A. M. (2022). Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-products: A review. *Frontiers in Nutrition*, 8, 815640. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640>