

УДК 663.03/664.6

INFLUENCE OF MAGNESIUM AND ZINC ON THE TECHNOLOGICAL PROCESS AND QUALITY OF BAKERY PRODUCTS: COMPARATIVE STUDY

V. Olishevskiy, E. Babko, Yu. Bondarenko, M. Tsyurpyta, D. Tsyurpyta
National University of Food Technologies

Key words:

minerals,
bakery products,
fermentation,
dough,
colloidal particles of
biogenic metals Mg and Zn

Article history:

Received 01.12.2024
Received in revised form
03.12.2024
Accepted 16.12.2024

Corresponding author:

bjuly@ukr.net

ABSTRACT

The nutrition of the population of Ukraine today is characterized by the so-called "hidden hunger" caused by a deficiency of both vitamins and minerals. Enrichment of bakery products with bioavailable forms of biogenic metals magnesium and zinc will make it possible to give products an increased biological value without increasing their caloric content and provide these minerals to a wide range of people.

The paper presents the results of a study of the use of colloidal solutions of magnesium and zinc obtained by the electric spark method in the formulation of wheat bread. The calculated amount of colloidal solutions of magnesium and zinc was added to the dough instead of the prescription amount of water.

It was found that magnesium and zinc, at the established dosages, caused the intensification of the fermentation process in the dough, and to a greater extent in the case of zinc. This made it possible to reduce the duration of proofing of dough pieces.

The finished products enriched with magnesium and zinc were characterized by a more intense color of the crust, especially in the sample with zinc, and a larger volume.

Despite the greater effect on improving the fermentation processes and the formation of the color of the crust of the products in the case of zinc, a larger volume of products was obtained in the sample with the addition of magnesium. This is due to the different effects of biogenic metals on the formation of the dough structure. In the case of zinc, the dough became stronger, and in the case of magnesium, the dough became more elastic. Improved elasticity of the dough with magnesium, at a lower fermentation intensity than in the sample with zinc, led to the formation of a larger volume of bread. It was assumed that the influence of magnesium and zinc on the course of biochemical processes in the dough system and the formation of rheological properties of the dough is associated with the ability of magnesium and zinc to be cofactors of enzymes involved in the metabolism of yeast and flour enzymes; with their ability to form bonds of different strengths with gluten proteins.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-36-7

ВПЛИВ МАГНІЮ ТА ЦИНКУ НА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС І ЯКІСТЬ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ: ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В. В. Олішевський, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0001-6972-6799

Є. М. Бабко, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0003-2389-007X

Ю. В. Бондаренко, канд. техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-3781-5604

М. Є. Цюрпита, аспірант, ORCID ID: 0009-0002-2922-3518

Д. Є. Цюрпита, аспірант, ORCID ID: 0009-0007-3825-9631

Національний університет харчових технологій

У статті наведено результати дослідження використання в рецептурі пшеничного хліба колоїдних розчинів наноформ Mg і Zn, отриманих електроіскровим методом. Розраховану кількість колоїдних розчинів Mg і Zn вводили в тісто замість рецептурної кількості води.

Встановлено, що Mg і Zn зумовлювали інтенсифікацію процесу бродіння у тісті, особливо у разі внесення цинку. Це дало змогу скоротити тривалість вистоювання тістових заготовок. Готові вироби, збагачені Mg і Zn, характеризувалися яскравішим забарвленням скоринки, що було найбільш помітним у зразках із цинком, і більшим об'ємом, особливо у виробах із додаванням магнію.

Ключові слова: мінеральні речовини, хлібобулочні вироби, бродіння, тісто, колоїдні частинки біогенних металів Mg і Zn.

Вступ. Харчування визнано Всесвітньою організацією охорони здоров'я важливим фактором, що забезпечує збереження здоров'я людини та запобігає розвитку неінфекційних захворювань, які охопили всі країни сучасного світу [1]. Сьогодні в харчуванні населення багатьох країн, в тому числі й України, постала проблема «прихованого голоду». «Прихований голод» — це дефіцит у раціоні одного або більше мікроелементів (мінеральних речовин і вітамінів), який виникає при достатній або навіть надмірній енергетичній цінності раціону. Дефіцит мікроелементів часто залишається непоміченим протягом тривалого часу, однак він має довгострокові незворотні наслідки для здоров'я людини, що, у свою чергу, впливає на соціально-економічний розвиток суспільства. У всьому світі понад 2 млрд людей страждають від дефіциту живих мікроелементів [2—4].

Для вирішення проблеми недостатнього надходження мікроелементів з раціоном людини ВООЗ і ФАО рекомендовано застосовувати стратегію збагачення харчових продуктів та біозбагачення сировини [5].

Огляд останніх досліджень і публікацій. Дефіцит мікроелементів є серйозною проблемою для здоров'я населення у всьому світі. У країнах, що розвиваються, дефіцит мікроелементів, як правило, пов'язаний з недостатнім споживанням їжі та низькою біодоступністю мікроелементів. Проблема дефіциту мікроелементів у сучасному харчовому середовищі розвинених країн головним чином обумовлена споживанням великої кількості оброблених та ультраоброблених харчових продуктів. Процеси виготовлення харчових продуктів в індустріальних умовах, унаслідок складної промислової обробки сировини та напівфабрикатів, зумовлюють зниження вмісту або втрату незамінних мікроелементів, зокрема мінеральних речовин [6—8].

Мінеральні речовини є важливими складовими щоденного раціону людини, що забезпечують належний перебіг метаболічних процесів в організмі. За даними ВООЗ, у всьому світі серед мінеральних речовин найпоширенішим є дефіцит заліза, йоду та

цинку. Так, до 33% населення світу має дефіцит Fe, 30% населення світу недостатньо споживають I, а 25% мають ризик хронічного дефіциту Zn [9, 10].

Збагачення харчових продуктів є розповсюдженим способом у всьому світі для збалансування раціону, що дає змогу відновити втрачені під час обробки речовини або створити харчові продукти з підвищеною харчовою цінністю та функціональними властивостями. Ефективність цього підходу обґрунтована тим, що приймання препарату або харчової добавки, яка містить дефіцитний мікроелемент, може призводити до тимчасового швидкого підвищення концентрації цієї речовини в плазмі крові, тоді як споживання продуктів, збагачених тією ж поживною речовиною, обумовлює поступове її надходження в організм. При цьому ефективним є підхід збагачення харчових продуктів, що споживаються населенням регулярно, оскільки це дає змогу охопити великі групи населення без внесення змін у структуру їх харчування, забезпечуючи підтримання постійних фізіологічних запасів мікроелемента [11].

Наразі понад 140 країн у всьому світі мають програми збагачення харчових продуктів або фортificaції сировини дефіцитними мікроелементами. Позитивна практика збагачення харчових продуктів дефіцитними мінеральними речовинами дала змогу знизити захворюваність на анемію та зоб серед населення багатьох країн [12].

Незважаючи на постійні дебати в усьому світі щодо ефективності та безпечності збагачення харчових продуктів, цей підхід дав змогу досягти зниження поширеності аліментарних захворювань. Проте збагачення харчових продуктів мікронутрієнтами повинно здійснюватися тільки на основі науково обґрунтованих, перевірених практикою медико-біологічних і технологічних принципів і вимог. Для того, щоб збагачення харчових продуктів було безпечним і регульованим, воно повинно реалізовуватися відповідно до прийнятих національних програм та бути під увагою уряду, як це відбувається в більшості країн Європи, Канаді, США, Австралії [12—14].

У харчуванні населення України сьогодні також спостерігається так званий «прихований голод», спричинений дефіцитом як вітамінів, так і мінеральних речовин. За даними національного дослідження структури харчування українців, це зумовлено тим, що більшість населення споживає недорогі продукти з низькою біологічною цінністю, але високою енергетичною насиченістю [14—16].

Наразі в Україні відсутня обов'язкова фортificaція. Натомість за ініціативою виробників харчової продукції впроваджується добровільна фортificaція деяких продуктів з метою надання їм конкурентної переваги. У зв'язку з цим на загальнодержавному рівні було затверджено спеціальні норми для вітамінів і мінеральних речовин, що використовуються як інгредієнти продуктів харчування [17]. Для розроблення законодавчих засад щодо збагачення харчових продуктів мікронутрієнтами з метою забезпечення захисту і зміцнення здоров'я населення України, запобігання хворобам, покращення якості та збільшення тривалості життя Кабінетом Міністрів України у березні 2024 р. до громадського обговорення представлено постанову «Про затвердження Порядку фортificaції харчових продуктів», яка визначатиме підстави та процедуру запровадження обов'язкової фортificaції харчових продуктів окремими вітамінами та/або мінеральними речовинами [18].

В умовах воєнного стану населення України зазнає підвищеного нервово-емоційного навантаження та стресу, що обумовлює підвищену потребу в мінеральних речовинах, зокрема в магнії. Недостатнє надходження цього мікроелемента призводить до зниження стресостійкості, м'язової слабкості та порушення серцевого ритму. Іони Mg беруть участь у передачі нервових імпульсів, активації ферментів, формуванні третинної структури ДНК чим обумовлюють перебіг в організмі 350 біохімічних

процесів, забезпечуючи енергетичний обмін і підтримуючи функціонування м'язів, нервової системи, імунної системи. Магній також бере участь у регулюванні рівня глюкози в крові. Особлива потреба в цьому елементі у військовослужбовців, які постійно зазнають підвищеного стресу та фізичних навантажень [19, 20].

Світова увага до дефіциту цинку стрімко зростає за останні 15 років. Цинк є важливим компонентом більш ніж 300 ферментів, обумовлює метаболізм нуклеїнових кислот і білків, ріст, поділ і функціонування клітин. Завдяки цьому цинк сприяє прискоренню загоєння ран і регенерації шкіри, покращує фізичну витривалість і прискорює відновлення. Цинк бере участь у розщепленні вуглеводів, посилює дію інсуліну, підтримуючи нормальний рівень цукру в крові, сприяє збереженню психічного здоров'я і підтримці психоемоційного стану. Також цинк бере участь в синтезі серотоніну — «гормону радості», який покращує настрій, сон і допомагає протистояти стресу [21, 22].

Забезпечення достатнього надходження цих мінеральних речовин у раціоні українців є особливо важливим, враховуючи напружені умови життя, зумовлені воєнними діями на території України.

Для збагачення харчових продуктів мінеральними речовинами переважно використовують солі неорганічних кислот — карбонати, сульфати, фосфати тощо. Однак мінерали в цій формі мають низьку біологічну доступність. Перспективним є проведення досліджень щодо використання біодоступних форм мінеральних речовин у виробництві харчових продуктів.

У раціоні населення України статус основного продукту харчування мають хлібобулочні вироби. Подолання «прихованого голоду» збагаченням хлібобулочних виробів біодоступними формами біогенних металів магнію та цинку надасть виробам підвищеної біологічної цінності без збільшення їх калорійності та забезпечить цими мінеральними речовинами широкі верстви населення.

Метою дослідження є встановлення впливу біогенних металів Mg і Zn, включених у рецептуру пшеничного тіста у вигляді колоїдних розчинів, на параметри технологічного процесу та якість хліба.

Матеріали і методи. Для збагачення мінеральними речовинами було обрано хліб з пшеничного борошна вищого сорту, що має таку рецептуру: борошно пшеничне вищого сорту 1000 г, дріжджі пресовані 30 г, сіль кухонна харчова 15 г. Вологість хліба 42%. Це був контрольний зразок. Для встановлення впливу Mg і Zn на хід технологічного процесу та формування якості виробів готували дослідні зразки, в яких рецептурну кількість води замінювали на розчини металів.

Біогенні метали Mg і Zn використовували у вигляді седиментаційно-стабільних водних колоїдних розчинів (рис. 1), отриманих методом об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металів у рідині внаслідок електричної ерозії поверхні гранул металів Mg і Zn у водному середовищі з подальшим їх випаровуванням і конденсацією у рідині [23, 24]. Для приготування робочих розчинів біогенних металів використовувалася бідистильована вода.

Проведена ТЕМ мікроскопія водних колоїдних розчинів металів Mg і Zn, отриманих електроіскровим способом, показує, що величина розмірності частинок металів знаходиться відповідно в межах: для Mg — 30...85 нм, Zn — 90...300 нм (рис. 2). Їх нанорозмірність забезпечує високу біодоступність.

Характеристики отриманих водних колоїдних розчинів магнію та цинку наведено в табл. 1.

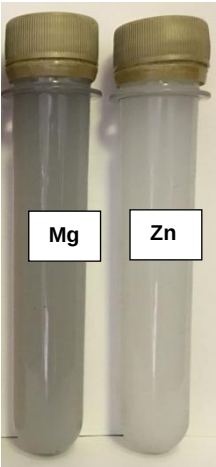


Рис. 1. Зовнішній вигляд водних колоїдних розчинів металів електроіскрового способу

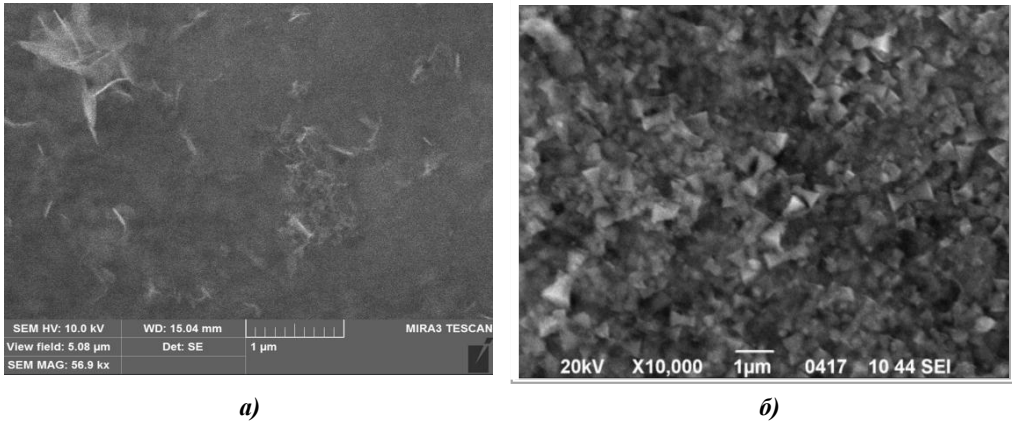


Рис. 2. Водні колоїдні розчини металів електроіскрового способу:
а, б — відповідно до мікрофотографії TEM частинок металів Mg та Zn

Таблиця 1. Характеристики водних колоїдних розчинів металів, отриманих електроіскровим способом

№ п.п.	Наночастинки металу	Концентрація металу в розчині, г/дм ³	Електрокінетичний потенціал, мВ	Електро-провідність, мСм/см	pH
1.	Mg	1,2	+ 12,1	0,347	8,6
2.	Zn	1,1	– 10,1	0,98	9,0

Дозування розчинів металів для заміни рецептурної кількості води для замішування тіста встановлювали розрахунковим методом. При цьому враховували норму добової потреби магнію та цинку для людини, вміст цих мікроелементів у сировині, з якої готували хліб, концентрацію цинку та магнію у розчинах, а також керувалися підходом, що дозування колоїдного розчину металу повинне забезпечити вміст мінеральної речовини у добовій нормі споживання хліба (277 г), що задовольнятиме 50% добову потребу людини в магнії або цинку. Було встановлено, що у разі збагачення

хліба магнієм необхідно всю воду, передбачену для замішування тіста, замінити на розчин магнію. У випадку збагачення цинком було розраховано, що при замішуванні тіста зі 1000 г борошна достатньо замінити 50 см³ розрахованої кількості води колоїдним розчином цинку.

Колоїдні розчини біогенних металів вносили під час замішування тіста. Тісто готували безопарним способом. Замішування тіста проводили в тістомісильній машині ESHER (Італія) на першій швидкості 4—6 хв та 6—8 хв на другій швидкості. Початкова температура тіста становила 25—26 °С. Тісто залишали на бродіння протягом 90 хв (з однією обминкою через 60 хв) за температури 30—32 °С. Після бродіння тісто ділили на шматки масою по 450 г, з яких формували тістові заготовки для двох формових виробів та одного подового, які поміщали на вистоювання у шафу вистоювання Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) за температури 35—38 °С. Кінець вистоювання встановлювали органолептично. Вистояні тістові заготовки випікали в секційній печі Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) при подачі пари (6 сек) за температури 210—230 °С протягом 35—40 хвилин.

Кислотність, вологість тіста та його підймальну силу оцінювали загальноприйнятими методами [25]. Дослідження процесу бродіння у тісті проводили за аналізом динаміки виділення вуглекислого газу зі 100 г тіста за температури 30 °С [26].

Готовий хліб аналізували через 3 год після випікання за органолептичними (стан поверхні, правильність форми, структуру пористості, еластичність, колір і розжовуваність м'якушки, аромат і смак), фізико-хімічними показниками (питомий об'єм хліба, кислотність, пористість) та комплексним показником якості [25, 26].

Достовірність отриманих результатів забезпечувалася повторенням експериментів тричі. Отримані та представлені результати враховують середньоквадратичне відхилення; графічне представлення експериментальних даних проводили з використанням стандартних програм статистичної обробки — Microsoft Excel 2010.

Результати досліджень. За результатами пробного лабораторного випікання (табл. 2) встановлено, що внесення в тісто замість рецептурної кількості води колоїдних розчинів біогенних металів зумовлює підвищення, порівняно з контролем, кінцевої кислотності тіста на 0,8 та 1,0 град, відповідно, для зразків з магнієм та цинком, а також збільшення у цих зразках кількості виділеного вуглекислого газу за період бродіння тіста та вистоювання тістових заготовок на 6 та 10%. Це свідчить про більшу інтенсивність бродіння у зразках тіста, що містять додатково внесені магній і цинк. У цих зразках скорочується тривалість вистоювання тістових заготовок на 7—10 хв.

Таблиця 2. Показники технологічного процесу та якості хліба

Показник	Дослідні зразки		
	Контроль (без добавок)	З додаванням колоїд- ного розчину магнію	З додаванням колоїд- ного розчину цинку
Тісто			
Вологість тіста, %	43,9	43,7	43,9
Кінцева кислотність тіста, град	2,5	3,3	3,5
Тривалість вистоювання тістових заготовок, хв	67	60	57
Загальне газоутворення за період бродіння та вистоювання, см ³ /100 г тіста	615	652	677

Продовження таблиці 2

Характеристика тіста	Пружно-еластичне	Більш еластичне, ніж контроль	Більш пружне, ніж контроль
Хліб			
Стан поверхні	Гладенька		
Колір скоринки	Світло жовтий	Жовто- золотистий	Золотистий
Колір м'якушки	Світлий		
Стан пористості	Розвинена, середня	Розвинена, розміри пор більші, ніж у контролі	Розвинена, розміри пор більші, ніж у контролі
Еластичність м'якушки	Еластична		
Смак та аромат	Властиві пшеничному хлібу		
Питомий об'єм, см ³ /г	2,46	2,63	2,56
Формостійкість, Н/D	0,42	0,42	0,40
Пористість, %	69,0	72,0	71,0
Кислотність, град	2,1	2,8	2,8
Комплексний показник якості, бали	80,8	90,4	89,2

Для більш детального аналізу процесу бродіння у дослідних зразках було проаналізовано динаміку виділення вуглекислого газу (рис. 3).

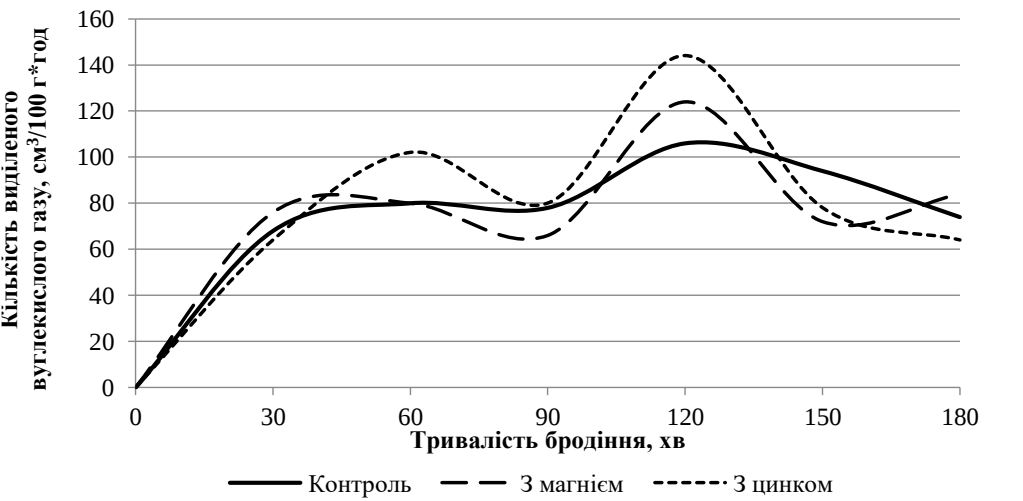


Рис. 3. Графік динаміки виділення вуглекислого газу в тісті

Встановлено, що у зразках з магнієм і цинком спостерігається двостадійний процес бродіння, як і в контрольному зразку. При цьому перебудова дріжджів на зброжування мальтози відбувається на 90 хв як для контролю, так і дослідних зразків. Однак кількість виділеного вуглекислого газу як при досягненні першого піку бродіння, так і другого більша у зразках з внесенням колоїдних розчинів магнію та цинку. При досягненні другого піку бродіння, що відзначається на 120 хв, у зразку з магнієм кількість виділеного вуглекислого газу була більшою, ніж у контролі, на 17%, а у зразку з цинком — на 35%. Найбільш виразний ефект щодо інтенсифікації процесу бродіння спостерігається у зразку з цинком.

За зовнішнім виглядом готові вироби (рис. 4, табл. 2) з магнієм і цинком характеризувалися більш насиченим кольором скоринки виробів, ніж контроль, при цьому найбільше покращання забарвлення було відзначено у зразку хліба, збагаченого цинком, скоринка якого набувала яскравого золотистого кольору.



Рис. 4. Фото формових виробів:

а — хліб без добавок (контроль); *б* — хліб, збагачений магнієм; *в* — хліб, збагачений цинком

Збагачення пшеничного хліба колоїдними розчинами магнію та цинку сприяло збільшенню питомого об'єму виробів на 7% та 4% відповідно та його пористості. На формування смаку й аромату виробів внесення біогенних металів не вплинуло, вони були властиві пшеничному хлібу, без присмаків і сторонніх запахів.

Узагальнена оцінка органолептичних і фізико-хімічних показників якості виробів за комплексним показником якості показала, що внесення магнію та цинку в рецептуру пшеничного хліба у наноформі сприяло покращанню їх якості, адже комплексний показник якості виробів з магнієм був більшим, порівняно з контролем, на 9,6 бала, а виробів з цинком — на 8,4 бала.

Отримані результати щодо покращання якості виробів, збагачених магнієм і цинком, імовірно, зумовлені впливом біогенних металів на перебіг ферментативних процесів у тістовій системі та їх взаємодією з основними біополімерами борошна. Зокрема, магній і цинк є кофакторами ферментів, що беруть участь у метаболізмі дріжджів, підвищуючи енергетичний обмін у дріжджовій клітині, що сприяє підвищенню швидкості бродіння. Як свідчать наші дані, і магній, і цинк, за встановлених дозувань зумовлювали певну інтенсифікацію процесу бродіння у тісті, і в більшій мірі у разі внесення цинку. У розчині цинку, що вносили в тісто, вищий рівень електропровідності, ніж у магнію, що свідчить про його вищу йонну активність, що може сприяти його більшій хімічній активності та біологічній доступності в перебігу біотехнологічних процесів у тісті. Крім того, магній і цинк можуть проявляти свою активність як кофактори ферментів борошна, зокрема амілолітичних, що зумовлюють розщеплення крохмалю з накопиченням цукрів. Підтвердженням припущення щодо збільшення накопичення в тістовій системі цукрів є не тільки інтенсифікація процесів бродіння внаслідок покращання живлення дріжджів, але й формування більш забарвленої скоринки виробів завдяки інтенсифікації реакції меланоїдиноутворення.

Однак, незважаючи на виявлений більший ефект щодо покращання процесів бродіння та формування забарвлення скоринки виробів у разі застосування цинку, біль-

ший об'єм виробів було отримано у зразку з внесенням магнію. Ймовірно, це зумовлено також впливом металів на клейковину тіста. Іони цинку мають високу афінність до сульфгідрильних (-SH) і карбоксильних (-COO⁻) груп білків, які присутні в клейковині тіста, утворюючи з ними сильні зв'язки, що сприятиме зміцненню клейковинної структури. Магній, у свою чергу, утворює переважно іонні зв'язки з полярними групами білків, що менш стійкі, ніж ті, що формує цинк. Однак здатність магнію формувати містки між молекулами білків, з'єднуючи різні ділянки білкових ланцюгів, забезпечує покращання еластичності тіста та його здатності утримувати вуглекислий газ під час бродіння. Відмінна здатність магнію та цинку взаємодіяти з білками тіста обумовила формування більш пружної, порівняно з контролем, структури тіста з цинком, та більшої еластичної у зразку з магнієм. Властивості тіста оцінювалися органолептично на стадії оброблення тістових заготовок. Покращання еластичності тіста з магнієм при меншій, ніж у зразку з цинком, інтенсивності бродіння зумовило формування більшого об'єму хліба. Наведені припущення щодо впливу магнію та цинку, внесених у тістову систему у вигляді колоїдних розчинів, на біохімічні процеси у тістовій системі потребують подальших досліджень.

Висновок. Встановлено, що збагачення пшеничного хліба наноформами магнію та цинку, внесених у тісто у вигляді колоїдних водних розчинів, замість рецептурної кількості води, зумовлює інтенсифікацію процесів бродіння у тістовій системі, певне скорочення тривалості вистоювання тістових заготовок та отримання виробів більшого об'єму з кращими органолептичними показниками, зокрема, щодо забарвлення скоринки. Додавання Mg та Zn у хлібобулочні вироби може мати значний потенціал для покращення раціону харчування різних груп населення, особливо тих, хто перебуває у стресових або фізично навантажених умовах, таких як військовослужбовці, спортсмени або люди, які виконують важку фізичну працю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуліч, М. П., Петренко, О. Д. (2023). Здорове харчування як фактор запобігання захворювань: політика ВООЗ та вітчизняний досвід (до 75-річчя діяльності ВООЗ в Україні). *Медичні перспективи*, 28(3), 152—162. <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.3.289218>.
2. Weffort, V. R. S., Lamounier, J. A. (2024). Hidden hunger — a narrative review. *Jornal de Pediatria*, 100, 10—17. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2023.08.009>.
3. Малахова, Л. В. (2013). Шляхи подолання «прихованого» голоду як складової глобальної продовольчої проблеми. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*, 1086, 86—89.
4. Lowe, N. M. (2021). The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. *Proceedings of the Nutrition Society*, 80(3), 283—289. <https://doi.org/10.1017/s0029665121000902>.
5. Osendarp, S. J. M. et al. (2018). Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food and Nutrition Bulletin*, 39(2), 315—331. <https://doi.org/10.1177/0379572118774229>.
6. Martini, D. et al. (2021). Ultra-Processed Foods and Nutritional Dietary Profile: A Meta-Analysis of Nationally Representative Samples. *Nutrients*, 13(10), 3390. <https://doi.org/10.3390/nu13103390>.
7. Monteiro, C. A. et al. (2019). Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. *Public Health Nutrition*, 22(5), 936—941. <https://doi.org/10.1017/s1368980018003762>.
8. Costa, R. M. et al. (2024). Quantitative Assessment of the Inadequate Intake of Macronutrients, Minerals, and Vitamins Associated with Ultra-Processed Food Consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(7), 888. <https://doi.org/10.3390/ijerph21070888>.
9. Das, J. K., Padhani, Z. A. (2022). Alleviating hidden hunger: an infallible bridge to improved health and nutrition. *The Lancet Global Health*, 10(11), 1539—1540. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(22\)00421-1](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(22)00421-1).

10. Manzoor, M. F. et al. (2024). Bioaccessibility mechanisms, fortification strategies, processing impact on bioavailability, and therapeutic potentials of minerals in cereals. *Future Foods*, 10, 100425. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100425>.
11. Hennessy, A., Walton, J., Flynn, A. (2013). The impact of voluntary food fortification on micronutrient intakes and status in European countries: a review. *Proceedings of the Nutrition Society*, 72(4), 433—440. <https://doi.org/10.1017/s002966511300339x>.
12. Olson, R. et al. (2021). Food Fortification: The Advantages, Disadvantages and Lessons from Sight and Life Programs. *Nutrients*, 13(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/nu13041118>.
13. Luthringer, C. L. et al. (2015). Regulatory Monitoring of Fortified Foods: Identifying Barriers and Good Practices. *Global Health: Science and Practice*, 3(3), 446—461. <https://doi.org/10.9745/ghsp-d-15-00171>.
14. Аналіз регуляторного впливу до проекту наказу Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Правил додавання вітамінів, мінеральних речовин та деяких інших речовин до харчових продуктів». URL: <http://surl.li/gdazqr> (дата звернення: 18.10.2024).
15. Петренко, О. Д., Гуліч, М. П. (2024). Ретроспективний аналіз споживання основних груп харчових продуктів населенням України. *Environment & Health*, 2(111), 48—53. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.02.048>.
16. Поручинська, І. та ін. (2022). Статистичний аналіз споживання продуктів харчування в Україні. *Науковий вісник Чернівецького університету*, 838, 13—19 <https://doi.org/10.31861/geo.2022.838.13-19>.
17. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 16.07.2020 р. № 1613 «Про затвердження Правил додавання вітамінів, мінеральних речовин та деяких інших речовин до харчових продуктів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0891-20#Text> (дата звернення: 18.10.2024).
18. Проект постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку фортифікації харчових продуктів». URL: <http://surl.li/jayxdz> (дата звернення: 18.10.2024).
19. Shahi, A. et al. (2019). The role of magnesium in different inflammatory diseases. *Inflammopharmacology*, 27(4), 649—661. <https://doi.org/10.1007/s10787-019-00603-7>.
20. Pickering, G. et al. (2020). Magnesium Status and Stress: The Vicious Circle Concept Revisited. *Nutrients*, 12(12), 3672. <https://doi.org/10.3390/nu12123672>.
21. Prasad, A. S. (2014). Impact of the discovery of human zinc deficiency on health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(4), 357—363. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.09.002>.
22. Cabrera, Á. J. R. (2015). Zinc, aging, and immunosenescence: an overview. *Pathobiology of Aging & Age-related Diseases*, 5(1), 25592. <https://doi.org/10.3402/pba.v5.25592>.
23. Олішевський, В. В. (2021). Науково-технічні засади застосування наноматеріалів для інтенсифікації масообмінних процесів харчових виробництв: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Київ.
24. Пристрій для отримання колоїду металу: патент на корисну модель 130939 Україна. № u201809540; заявл. 21.09.2018; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 3 с.
25. Дробот, В. І. (2019). *Довідник з технології хлібопекарського виробництва*. Київ: ПрофКнига.
26. *Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів*: навчальний посібник / за ред. чл.-кор. В. І. Дробот. Київ: Кондор-Видавництво, 2015.