

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВИСОЦЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 637.344:66.017.2:577.112


ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБґРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК SiO_2 ТА ZnO В
ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ СИРОВАТКИ
МОЛОЧНОЇ**

Спеціальність 181 Харчові технології
Галузь знань 18 Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.О. Висоцький

Науковий керівник: Кочубей-Литвиненко Оксана
Валер'янівна доктор технічних наук, професор



Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Висоцький О.О. Обґрунтування застосування наночастинок SiO₂ та ZnO в технологіях харчових продуктів на основі сироватки молочної. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 «Харчові технології» – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено науковому обґрунтуванню можливостей застосування наночастинок пірогенного кремнезему та оксиду цинку в технології харчових продуктів на основі сироватки молочної для підвищення якості, безпечності та ефективності виробництва харчових продуктів.

У дисертаційній роботі проведено аналіз сучасного світового досвіду використання наноматеріалів у харчовій промисловості задля оцінки перспективи застосування пірогенного кремнезему і оксиду цинку в технологіях харчових продуктів на основі сироватки молочної.

Встановлено конкретні закономірності впливу наночастинок SiO₂ та ZnO на сироватку молочну та харчові продукти на її основі. Показано, що наночастинок пірогенного кремнезему ефективно адсорбують сироваткові білки з сироватки молочної. Відповідно до збільшення внесеної наважки кремнезему 0,25 %...2 % ступінь вилучення сироваткових протеїнів зростає 17 %...55 %. Оптимальні умови адсорбції білків сироватки встановлено при використанні гідрофільного пірогенного кремнезему в концентрації близько 1,5 % за температури ~45 °С. За таких параметрів масова частка білка у сироватці знижується більш ніж удвічі – з 1,10 % до 0,5 %. Подальше підвищення температури вище 45 °С не призводить до значного покращення ефективності адсорбції, що свідчить про ймовірне насичення

поверхневих центрів кремнезему або часткову денатурацію білкових молекул.

Використання ультразвукового диспергування суспензії кремнезему сприяло інтенсифікації процесу за рахунок руйнування агломератів наночастинок та рівномірного розподілу активних центрів, що забезпечує більш повне зв'язування білків.

Досліджено якісний склад протеїнів сироватки молочної. На основі проведеного аналізу, шляхом електрофоретичного методу було доведено відсутність вираженої селективності наночастинок пірогенного кремнезему щодо конкретного молекулярного класу білків.

Оцінено можливості застосування кремнезему для стабілізації властивостей сухої молочної сироватки. Додавання $\sim 1\%$ пірогенного SiO_2 до порошку сироватки підвищило температуру склування продукту на $\sim 10^\circ\text{C}$, що покращує його стійкість під час зберігання (за звичайних умов зберігання $0\dots 20^\circ\text{C}$ та відносної вологості $\leq 80\%$ порошок із підвищеною T_g залишається у склоподібному стані).

Встановлено, що кремнезем є дієвим антизлежувальним агентом: після прискореного тесту на злежування ступінь злежування зразка з SiO_2 становив лише $\sim 8\%$, що дозволяє класифікувати продукт як такий, що не злежується. Отже, пірогенний кремнезем вітчизняного виробництва (марки А-300) рекомендовано як ефективну харчову нанодобавку для запобігання злежуванню сухої молочної сироватки та підтримання її якості в процесі зберігання.

Доведено здатність нанокремнезему адсорбувати радіонукліди, зокрема ^{137}Cs із сироватки молочної. Механізм очищення полягає у комплексоутворенні наночастинок кремнезему з молочними білками та адсорбції радіоцезію цими білково-кремнеземними комплексами, які потім видаляються шляхом центрифугування або фільтрації. Даний підхід сприяє зниженню радіаційного навантаження на готову продукцію та відкриває

можливості безпечного використання молочної сироватки з екологічно проблемних територій.

Досліджено вплив нанодисперсного оксиду цинку на процеси ферментації сироватки молочної. Наночастинки ZnO, синтезовані методом електроіскрового диспергування безпосередньо у рідкій сироватці, введено у концентраціях, що забезпечують збагачення середовища іонами цинку в межах технологічно допустимих норм. Показано, що присутність наночастинок ZnO позитивно впливає на розвиток молочнокислих бактерій: збільшується електропровідність середовища та підвищується окисно-відновний потенціал, що свідчить про зростання концентрації іонів і зміну редокс-умов на більш сприятливі для біохімічних процесів. У результаті, наростання кислотності відбувається інтенсивніше – тривалість ферментації до досягнення заданої кислотності (150 ± 5 °T) скорочується майже вдвічі порівняно з контролем (з $32 \pm 0,5$ год до $17 \pm 0,5$ год).

Отриману ферментовану сироватку молочну, збагачену наночастинками ZnO, запропоновано використовувати як натуральний функціональний інгредієнт у подальших харчових технологіях. Зокрема, встановлено її ефективність у виробництві кисломолочного продукту – м'якого сиру, отриманого термокислотним способом.

Доведено ефективність застосування сироватки молочної у хлібопекарському виробництві. Внесення концентрованої сироватки молочної, отриманої з використанням наночастинок ZnO, до рецептури житньо-пшеничного тіста сприяє підвищенню титрованої кислотності тіста та активізує бродильні процеси. В результаті під час випікання якісні показники хліба поліпшуються: питомий об'єм буханця збільшується більш ніж на 11 % порівняно з контролем, підвищується формостійкість виробів. Покращена структура м'якушки характеризується рівномірною пористістю і еластичністю. Показано, що використання ферментованої сироватки уповільнює процес черствіння хліба: через 72 години зберігання хліб із

додаванням сироватки мав ступінь черствіння на 26...31 % нижчий, ніж у контрольного зразка.

Окрему увагу приділено оцінці безпечності запропонованих нанотехнологічних рішень. Проаналізовано нормативні вимоги щодо використання діоксиду кремнію (E551) і сполук цинку у харчових продуктах. Діоксид кремнію дозволений як харчова добавка-антиконсолідант у сухих продуктах у кількості до 1 % і вважається інертним та безпечним для вживання у зазначених дозах. Солі цинку застосовуються у харчових технологіях для збагачення продуктів цим мікроелементом, проте для наноформи ZnO прямих регламентів ще немає, що зумовлює необхідність додаткових досліджень.

В роботі проведено токсикологічну оцінку наночастинок ZnO методами *in vitro*. Показано, що високі концентрації нанодисперсного ZnO можуть спричиняти цитотоксичні ефекти: експозиція плазмових білків людини до ZnO викликає структурні зміни білків та утворення активних форм кисню. У культурах клітин відмічено зниження метаболічної активності та життєздатності при перевищенні певного порогу концентрації наночастинок. На основі цих даних визначено умовно безпечні рівні додавання наночастинок ZnO в харчові продукти: концентрації, що забезпечують збагачення продукту цинком на рівні 10...20 % від добової норми споживання, не спричиняють помітної цитотоксичності та відповідають нормативам по вмісту цинку.

Таким чином, доведено безпечність запропонованих нанотехнологій за умови дотримання рекомендованих концентрацій наночастинок, що підтверджує можливість їх впровадження у харчове виробництво.

Соціальний ефект від впровадження наукової розробки полягає у забезпеченні раціональної та безпечної утилізації молочної сироватки як побічного продукту молокопереробної галузі, що дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля, скоротити втрати цінних харчових

речовин і створити нові продукти функціонального призначення. Розроблена технологія сприяє підвищенню продовольчої безпеки завдяки збагаченню харчових продуктів біодоступними мікронутрієнтами. Запропоновані рішення відповідають принципам сталого розвитку, сприяють розширенню асортименту інноваційних продуктів харчування і можуть бути адаптовані на підприємствах малого та середнього бізнесу.

Достовірність отриманих результатів підтверджено за рахунок використання стандартизованих методів дослідження, сучасного аналітичного обладнання, а також застосування математичної статистики, включно з методами моделювання та кореляційного аналізу. Повторюваність експериментів засвідчила стабільність виявлених закономірностей. Проведення досліджень у лабораторіях Національного університету харчових технологій і партнерських наукових установ підтвердило надійність результатів у різних експериментальних умовах.

Ключові слова: сироватка молочна, пірогенний кремнезем, наночастинки ZnO, адсорбція білків, ферментація, сир м'який, хлібобулочні вироби, суха сироватка, якість, стабільність під час зберігання, безпечність.

Перелік публікацій за тематикою дисертаційної роботи

1. Кочубей-Литвиненко, О. В., Білик, О. А., Дубівко, А. С., Висоцький, О. О., & Швець, Д. П. (2020). Дослідження впливу електроіскрового оброблення на білки молочної сироватки. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 26(5), 182–189.

(*Особистий внесок Висоцького О. О.: проведення експериментальних досліджень, аналіз білкових фракцій, обробка результатів, оформлення тексту; особистий внесок Кочубей-Литвиненко О. В.: наукове керівництво, постановка завдань, редагування тексту; Білик О. А.: аналіз літературних джерел, формулювання висновків; Дубівко А. С.: участь у проведенні лабораторних досліджень, обробка результатів; Швець Д. П.: формування та обробка графічного матеріалу*)

2. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2022). Вплив пірогенного кремнезему на стабільність сироватки молочної сухої під час зберігання. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 28(5), 158–167.

3. Vysotskyi, O., Kochubei-Litvinenko, O., Bilyk, O., & Bilokhatniuk, V. (2023). Use of fermented acid whey enriched with mineral elements in the technology of rye-wheat bread. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 23(4), 28–34. (Особистий внесок Vysotskyi O.: проведення експериментальних досліджень, аналіз результатів, написання рукопису; Kochubei-Litvinenko O.: планування експерименту, наукове редагування; Bilyk O.: статистичний аналіз, планування експерименту; Bilokhatniuk V.: оцінювання органолептичних показників і характеристик хліба)

4. Kochubei-Lytvynenko, O., Bilyk, O., Vysotskyi, O., & Zabroda, A. (2024). Consideration of technological and safety aspects of using zinc oxide nanoparticles for intensifying whey fermentation. *Technology audit and production reserves*, 4(3 (78)).

(Особистий внесок Vysotskyi O.: проведення експериментів із ферментацією, вивчення змін мікробіологічних показників; Kochubei-Lytvynenko O.: наукове керівництво, формулювання мети і завдань; Bilyk O.: проведення експериментів із ферментацією, токсикологічне обґрунтування; Zabroda A.: аналіз нормативних аспектів безпечності.)

5. Кочубей-Литвиненко, О. В., Дубівко, А. С., & Висоцький, О. О. (2024). Оцінювання цитотоксичності наночастинок ZnO альтернативним методом на білках плазми крові людини в умовах *in vitro*. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 30(3), 167–174.

(Особистий внесок Висоцького О. О.: підготовка біологічних зразків, допомога у підготовці графічного матеріалу, аналіз результатів; Кочубей-Литвиненко О. В.: наукове керівництво, загальне редагування; Дубівко А. С.: проведення спектрофотометричних вимірювань.)

Тези доповідей і матеріали конференцій

6. Кочубей-Литвиненко, О. В., Висоцький, О. О., & Маринін, А. І. (2021). Перспективи використання пірогенного діоксиду кремнію у якості антизлежувальної харчової добавки для сироватки молочної сухої. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні: Матеріали I міжнародної науково-практичної конференції (29–30 листопада 2021 р., Київ) (с. 80–83). Київ: НУХТ.

7. Висоцький, О. О., Кочубей-Литвиненко, О. В., & Маринін, А. І. (2022). Підвищення стабільності до зберігання сироватки молочної сухої шляхом використання пірогенного кремнезему. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 88-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (15–16 квітня 2022 р., Київ) (Ч. 1, с. 243). Київ: НУХТ.

8. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Перспективи використання діоксиду кремнію E551 у якості радіопротекторної добавки для очищення молочної сироватки. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції (25 жовтня 2023 р., Київ) (с. 67). Київ: НУХТ.

9. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Пірогенний кремнезем – перспективна радіопротекторна добавка для очищення молочної сировини. У Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України (м. Київ, 25 травня 2023 р.) (с. 288–290). Київ.

10. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Перспективи очищення сироватки молочної від білку застосуванням пірогенного кремнезему. У Сучасні тренди і перспективи в галузі переробки м'яса і молока: Програма та тези матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 21 вересня 2023 р.) (с. 11–12). Київ: НУХТ.

11. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2024). Перспективи використання освітленої пірогенним кремнеземом молочної сироватки як косубстрату для виробництва біогазу. Молочна промисловість від виробника до споживача: Сучасні тренди та орієнтири: Програма та матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (29 травня 2024 р., Київ) (с. 64). Київ: НУХТ.

12. Кочубей-Литвиненко, О. В., Дубівко, А. С., Висоцький, О. О., & Дмитруха, Н. В. (2024). Визначення кисень-активууючої активності макрофагів щурів під впливом наночастинок ZnO в НСТ-тесті у порівнянні із сіллю ZnSO₄. Молочна промисловість від виробника до споживача: Сучасні тренди та орієнтири: Програма та матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (29 травня 2024 р., Київ) (с. 72). Київ: НУХТ.

13. Кочубей-Литвиненко, О. В., Білик, О. А., & Висоцький, О. О. (2024). Обґрунтування шляхів удосконалення технології сироватки молочної сухої, як імперативу продовольчої безпеки. У Сучасні аспекти реформування системи публічного управління в умовах воєнного часу: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Переяслав, 7 червня 2024 р.) (с. 175–179).

14. Висоцький, О. О., Забрда, А. В., Кочубей-Литвиненко, О. В., & Білик, О. А. (2024). Сироватка кисла ферментована, збагачена мінеральними елементами у технології хлібобулочних виробів для людей похилого віку. Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical

Conference “Business Culture in the Conditions of Socio-Cultural Transformation of Society” (Ліон, Франція, 23–26 липня 2024 р.) (с. 199–201).

15. Кочубей-Литвиненко, О. В., & Висоцький, О. О. (2024). Наночастинки ZnO як фактор інтенсифікації процесу виробництва сироватки ферментованої кислоти. У XIII-та Міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології у контексті Євроінтеграції» (м. Київ, 21–22 листопада 2024 р.) (с. 202–204). Київ: НУХТ.

16. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2025). Дослідження адсорбційних властивостей пірогенного кремнезему за допомогою електрофоретичного аналізу білків сироватки молочної. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (7–11 квітня 2025 р., Київ) (Ч. 1, с. XX). Київ: НУХТ.

17. Роговий, О., Висоцький, О., & Кочубей-Литвиненко, О. (2025). Перспективи використання нано-ZnO для інтенсифікації ферментування сироватки молочної кислоти в умовах крафтового виробництва. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (7–11 квітня 2025 р., Київ) (Ч. 1). Київ: НУХТ.

SUMMARY

Vysotskyi O.O. Justification for the use of SiO₂ and ZnO Nanoparticles in the Technology of Dairy Whey-Based Food Products. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 181 “Food Technologies” – National University of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation is devoted to the scientific justification of the potential use of pyrogenic silica and zinc oxide nanoparticles in the technology of dairy whey-based food products, with the aim of improving their quality, safety, and production efficiency.

The dissertation analyzes current global experience in the use of nanomaterials in the food industry to assess the prospects of applying pyrogenic silica and zinc oxide in food product technologies based on dairy whey.

Specific patterns of the influence of SiO₂ and ZnO nanoparticles on dairy whey and whey-based food products have been established. It has been shown that pyrogenic silica nanoparticles effectively adsorb whey proteins from dairy whey. As the amount of added silica increases from 0.25 % to 2 %, the degree of whey protein removal increases from 17 % to 55 %.

The optimal conditions for whey protein adsorption were determined when using hydrophilic pyrogenic silica at a concentration of approximately 1.5% and a temperature of ~45 °C. Under these conditions, the protein content in whey decreases by more than half — from 1.10 % to 0.5 %. Further increases in temperature above 45 °C do not lead to a significant improvement in adsorption efficiency, indicating a probable saturation of the active surface sites of the silica or partial denaturation of the protein molecules.

The use of ultrasonic dispersion of the silica suspension intensified the process by breaking up nanoparticle agglomerates and ensuring a uniform distribution of active sites, which facilitated more complete protein binding.

The qualitative composition of whey proteins was investigated. Electrophoretic analysis demonstrated the absence of pronounced selectivity of pyrogenic silica nanoparticles toward any specific molecular class of proteins.

The potential of silica to stabilize the properties of dry whey was also evaluated. The addition of approximately 1 % pyrogenic SiO₂ to whey powder increased the glass transition temperature (T_g) by about 10 °C, thereby improving the product's stability during storage. Under standard conditions (0–20 °C and

relative humidity $\leq 80\%$), the powder with elevated T_g remains in a glassy state.

It was established that silica is an effective anti-caking agent: after accelerated caking tests, the caking degree of the sample with SiO_2 was only $\sim 8\%$, which qualifies the product as non-caking. Therefore, domestically produced pyrogenic silica (grade A-300) is recommended as an efficient food-grade nanomaterial for preventing caking of dry whey and preserving its quality during storage.

The ability of nanosilica to adsorb radionuclides, particularly ^{137}Cs from dairy whey, was also demonstrated. The purification mechanism involves the formation of complexes between silica nanoparticles and whey proteins, followed by the adsorption of radiocesium onto these protein–silica complexes, which are then removed by centrifugation or filtration. This approach helps reduce the radiation burden of the final product and enables the safe use of dairy whey originating from environmentally contaminated areas.

The influence of nanosized zinc oxide on the fermentation processes of dairy whey was investigated. ZnO nanoparticles, synthesized via electro-spark dispersion directly in the liquid whey, were introduced at concentrations that ensured zinc ion enrichment within technologically acceptable limits.

It was shown that the presence of ZnO nanoparticles positively affects the development of lactic acid bacteria: the electrical conductivity of the medium increases, and the redox potential rises, indicating a higher concentration of ions and more favorable redox conditions for biochemical processes. As a result, the acidification process accelerates significantly — the time required to reach the target acidity level (150 ± 5 °T) is nearly halved compared to the control (reduced from 32 ± 0.5 hours to 17 ± 0.5 hours).

The resulting fermented dairy whey enriched with ZnO nanoparticles is proposed for use as a natural functional ingredient in further food processing applications. In particular, its effectiveness has been demonstrated in the production of a cultured dairy product — soft cheese obtained via thermo-acid

coagulation.

The efficiency of using dairy whey in bakery production has also been confirmed. The incorporation of concentrated whey, obtained using ZnO nanoparticles, into the formulation of rye-wheat dough enhances the titratable acidity and activates fermentation processes. As a result, the quality characteristics of the bread improve during baking: the specific loaf volume increases by more than 11 % compared to the control, and the shape stability of the product is enhanced. The improved crumb structure is characterized by uniform porosity and elasticity. It was also shown that the use of fermented whey slows down bread staling: after 72 hours of storage, bread containing whey exhibited a 26...31 % lower staling rate than the control sample.

Particular attention was paid to the safety assessment of the proposed nanotechnological solutions. Regulatory requirements concerning the use of silicon dioxide (E551) and zinc compounds in food products were analyzed. Silicon dioxide is permitted as an anti-caking food additive in dry products at levels up to 1 % and is considered inert and safe for consumption within the specified limits. Zinc salts are used in food technologies to enrich products with this essential micronutrient; however, there are currently no specific regulations for the nanoform of ZnO, which highlights the need for further research.

The study included a toxicological evaluation of ZnO nanoparticles using in vitro methods. It was shown that high concentrations of nanosized ZnO can induce cytotoxic effects: exposure of human plasma proteins to ZnO leads to structural alterations of proteins and the formation of reactive oxygen species. In cell cultures, reduced metabolic activity and viability were observed when nanoparticle concentrations exceeded a certain threshold. Based on these findings, conditionally safe levels of ZnO nanoparticle addition to food products were established: concentrations that enrich the product with zinc at 10...20 % of the recommended daily intake do not cause noticeable cytotoxicity and comply with regulatory limits for total zinc content.

Thus, the safety of the proposed nanotechnological approaches has been confirmed, provided that the recommended concentrations of nanoparticles are observed, which supports their potential implementation in food production.

The social impact of the developed solution lies in enabling the rational and safe utilization of dairy whey as a by-product of the dairy industry, thereby reducing environmental burden, minimizing the loss of valuable nutrients, and enabling the creation of new functional food products.

The developed technology contributes to food security by enriching food products with bioavailable micronutrients. The proposed solutions align with the principles of sustainable development, promote the diversification of innovative food offerings, and can be adapted for use by small and medium-sized enterprises.

The reliability of the obtained results was ensured through the use of standardized research methods, advanced analytical equipment, and the application of mathematical statistics, including modeling and correlation analysis techniques. The reproducibility of experiments confirmed the consistency of the observed patterns. The studies conducted in the laboratories of the National University of Food Technologies and partner research institutions validated the reliability of the results under various experimental conditions.

Keywords: dairy whey, pyrogenic silica, ZnO nanoparticles, protein adsorption, fermentation, soft cheese, bakery products, dry whey, quality, storage stability, safety.

List of Publications Related to the Dissertation Topic

1. Kochubey-Lytvynenko, O., Bilyk, O., Dubivko, A., Vysotskyi, O., & Shvets, D. (2020). Study of the influence of electro-spark treatment on whey protein. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*, 26(5), 182–189.
2. Vysotskyi, O., & Kochubei-Lytvynenko, O. (2022). The influence of pyrogenic silica on the stability of dry milk whey during storage. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*, 28(5), 158–167.

3. Vysotskyi, O., Kochubei-Litvinenko, O., Bilyk, O., & Bilokhatniuk, V. (2023). Use of fermented acid whey enriched with mineral elements in the technology of rye-wheat bread. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 23(4), 28–34.
4. Kochubei-Lytvynenko, O., Bilyk, O., Vysotskyi, O., & Zabroda, A. (2024). Consideration of technological and safety aspects of using zinc oxide nanoparticles for intensifying whey fermentation. *Technology audit and production reserves*, 4(3 (78)).
5. Kochubei-Lytvynenko, O. V., Dubivko, A. S., & Vysotskyi, O. O. (2024). Evaluation of the cytotoxicity of ZnO nanoparticles by an alternative method on human blood plasma proteins under in vitro conditions. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*, 30(3), 167–174.

Conference Abstracts and Proceedings

6. Kochubei-Lytvynenko, O. V., Vysotskyi, O. O., & Marynin, A. I. (2021). Prospects for the use of pyrogenic silicon dioxide as an anti-caking food additive for dry milk whey. In Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference “Problems and Practical Approaches to the Production and Regulation of Food Additives in the EU and Ukraine” (November 29–30, 2021, Kyiv) (pp. 80–83). Kyiv: NUFT.
7. Vysotskyi, O. O., Kochubei-Lytvynenko, O. V., & Marynin, A. I. (2022). Enhancing the storage stability of dry milk whey using pyrogenic silica. Proceedings of the 88th International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students “Scientific Achievements of Youth – Solving the Problems of Human Nutrition in the 21st Century” (April 15–16, 2022, Kyiv), Part 1, p. 243. Kyiv: NUFT.
8. Vysotskyi, O. O., & Kochubei-Lytvynenko, O. V. (2023). Prospects for the use of silicon dioxide (E551) as a radioprotective additive for milk whey purification. In Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Problems and Practical Approaches to the Production and

Regulation of Food Additives in the EU and Ukraine” (October 25, 2023, Kyiv), p. 67. Kyiv: NUFT.

9. Vysotskyi, O. O., & Kochubei-Lytvynenko, O. V. (2023). Pyrogenic silica – a promising radioprotective additive for the purification of dairy raw materials. In Food and environmental security during war and post-war recovery: challenges for Ukraine and the world: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Section 3: The role of animal husbandry, veterinary medicine and food technologies during the war and in addressing the revival plan of Ukraine (Kyiv, May 25, 2023) (pp. 288–290). Kyiv.

10. Vysotskyi, O. O., & Kochubei-Lytvynenko, O. V. (2023). Prospects for whey protein removal using pyrogenic silica. In Modern trends and prospects in the field of meat and milk processing: Program and abstracts of the IV International Scientific and Practical Conference (Kyiv, September 21, 2023) (pp. 11–12). Kyiv: NUFT.

11. Vysotskyi, O. O., & Kochubei-Lytvynenko, O. V. (2024). Prospects for the use of pyrogenic silica-clarified whey as a co-substrate for biogas production. In the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Dairy Industry from Producer to Consumer: Modern Trends and Guidelines” (May 29, 2024, Kyiv), p. 64. Kyiv: NUFT.

12. Kochubei-Lytvynenko, O. V., Dubivko, A. S., Vysotskyi, O. O., & Dmytrukha, N. V. (2024). Determination of the oxygen-activating activity of rat macrophages under the influence of ZnO nanoparticles in the NBT test compared to ZnSO₄ salt. In the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Dairy Industry from Producer to Consumer: Modern Trends and Guidelines” (May 29, 2024, Kyiv), p. 72. Kyiv: NUFT.

13. Kochubei-Lytvynenko, O. V., Bilyk, O. A., & Vysotskyi, O. O. (2024). Justification of ways to improve the technology of dry whey as an imperative of food security. In Modern aspects of public administration system

reform in wartime: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (Pereiaslav, June 7, 2024) (pp. 175–179).

14. Vysotskyi, O. O., Zabroda, A. V., Kochubei-Lytvynenko, O. V., & Bilyk, O. A. (2024). Fermented acid whey enriched with mineral elements in the technology of bakery products for the elderly. In Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference “Business Culture in the Conditions of Socio-Cultural Transformation of Society” (Lyon, France, July 23–26, 2024), pp. 199–201.

15. Kochubei-Lytvynenko, O. V., & Vysotskyi, O. O. (2024). ZnO nanoparticles as a factor in intensifying the production process of fermented acid whey. In XIII International Scientific and Technical Conference "Scientific Problems of Food Technologies and Industrial Biotechnology in the Context of European Integration" (Kyiv, November 21–22, 2024) (pp. 202–204). Kyiv: NUFT.

16. Vysotskyi, O. O., & Kochubei-Lytvynenko, O. V. (2025). Study of the adsorption properties of pyrogenic silica using electrophoretic analysis of whey proteins. In Proceedings of the 91st International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students “Scientific Achievements of Youth – Solving the Problems of Human Nutrition in the 21st Century” (April 7–11, 2025, Kyiv), Part 1. Kyiv: NUFT.

17. Rohovyi, O., Vysotskyi, O., & Kochubei-Lytvynenko, O. (2025). Prospects for the use of nano-ZnO to intensify the fermentation of acid whey in craft production. In Proceedings of the 91st International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students “Scientific Achievements of Youth – Solving the Problems of Human Nutrition in the 21st Century” (April 7–11, 2025, Kyiv), Part 1. Kyiv: NUFT

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ	
НАНОТЕХНОЛОГІЙ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ	34
1.1 Світовий досвід застосування нанотехнологій у промисловості.	34
1.2 Обґрунтування необхідності та перспективи застосування нанокомпонентів у харчовій промисловості.....	38
1.3 Перспективи застосування наночастинок у молочній промисловості	43
1.4 Пірогенний кремнезем як перспективний нанокомпонент для харчової промисловості.....	49
1.5 Нано-оксид цинку як перспективний нанокомпонент для харчової промисловості	58
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ I.....	63
РОЗДІЛ II. ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ. ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА	
МЕТОДИ.....	66
2.1 Алгоритм проведення досліджень	66
2.2 Сировина та матеріали	69
2.3 Методи дослідження.....	70
2.3.1 Методи якісного та кількісного аналізу	70
2.3.2 Методи математично-статистичного аналізу	79
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ II	80
РОЗДІЛ III. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ	
НАНОЧАСТИНОК ПІРОГЕННОГО КРЕМНЕЗЕМУ В ТЕХНОЛОГІЇ	
МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ	81

3.1 Дослідження функціонально-технологічних властивостей пірогенного кремнезему та встановлення параметрів потенційного впливу на адсорбцію білків сироватки молочної	81
3.1.1 Вивчення впливу виду пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білка в сироватці молочної	86
3.1.2 Дослідження функціонально-технологічних показників гідрофільного пірогенного кремнезему.	88
3.2 Дослідження факторів впливу на адсорбцію білка сироватки молочної пірогенним кремнеземом	90
3.2.1 Визначення впливу питомої поверхні пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білка сироватки молочної	90
3.2.2 Визначення впливу кількості пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білків сироватки молочної	92
3.2.3 Дослідження впливу температури на ступінь адсорбції білків сироватки молочної	95
3.2.4 Дослідження впливу ультразвукового оброблення на ступінь адсорбції	97
3.3 Встановлення раціональних параметрів адсорбції протеїнів сироватки молочної гідрофільним пірогенним кремнеземом.....	101
3.4 Дослідження фракційного складу білків молочної сироватки: електрофоретичний аналіз та адсорбційні властивості	106
3.5 Дослідження мінерального складу сироватки молочної після адсорбції пірогенним кремнеземом	110
3.6 Дослідження здатності пірогенного кремнезему до сорбції радіонуклідів	112
3.7 Дослідження доцільності використання пірогенного кремнезему в якості антизлежувальної добавки	115
3.8 Наукове обґрунтування доцільності впровадження способу очищення білка при промисловому обробленні сироватки молочної для підприємств малої та середньої потужності.	125
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ III	134

РОЗДІЛ IV. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ЦИНКУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ФЕРМЕНТУВАННЯ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ....	136
4.1 Аналіз перспективних шляхів інтенсифікації ферментування сироватки молочної кислоти	136
4.2 Визначення функціонально-технологічних властивостей частинок оксиду цинку, отриманих електроіскровим диспергуванням гранул металу, як збагачуючого інгредієнту для сироватки молочної.....	139
4.3 Дослідження впливу наночастинок ZnO на інтенсифікацію сироватки молочної.....	149
4.4 Дослідження перспектив використання ферментованої сироватки, збагаченої цинком, в технологіях харчових продуктів.....	152
4.4.1 Використання ферментованої сироватки, збагаченої цинком, в якості коагулянта в технології м'яких сирів термокислотного зсідання	152
4.4.2 Використання кислоти сироватки молочної, збагаченої цинком, в технології житньо-пшеничного хліба.....	156
4.4.3 Удосконалення способу ферментування сироватки молочної кислоти шляхом збагачення нано-ZnO	162
4.5 Біобезпека наночастинок ZnO: цитотоксичний вплив	167
4.5.1 Оцінка цитотоксичності наночастинок ZnO за впливом на білкові структури	167
4.5.2 Визначення бактерицидної активності наночастинок ZnO методом НСТ-тесту в макрофагах щурів <i>in vitro</i>	172
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ IV.....	174
РОЗДІЛ V. СОЦІАЛЬНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	177
5.1 Вимоги Європейського Союзу до екологічної безпеки та сталого виробництва.....	177

5.2 Вимоги українського законодавства щодо екологічної безпеки та сталого виробництва харчової промисловості	182
5.2.1 Загальні принципи екологічного регулювання в Україні	182
5.2.2 Регулювання використання наноматеріалів у харчовій промисловості	185
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ V	188
ВИСНОВКИ	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	193
ДОДАТКИ	212
Додаток А. Акт апробації на виробництві гідрофільного пірогенного кремнезему в якості адсорбента для сироватки молочної, отриманої в результаті виробництва сиру м'якого сичужного.	212
Додаток Б. Акт промислової апробації способу виробництва хліба житньо-пшеничного з використанням сироватки молочної ферментованої кислотою, збагаченої наночастинками цинку у виробничих умовах ФОП «Білохатнюк Володимир Олександрович». .	215
Додаток В. Акт впровадження технології збагачення кислої молочної сироватки наночастинками цинку (ZnO) перед ферментацією у виробничих умовах.....	217
Додаток Г. Акт впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і дисертаційних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів.....	219
Додаток Д. Список публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.....	222

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПК – біохімічна потреба у кисні

ГДК – гранично допустима концентрація

ЕЮ – електроіскрове оброблення

ЕРК – електророзрядна камера

КУО – колонієутворюючі одиниці

МС – молочна сироватка

НЧ – наночастинки

ПАР – поверхнево-активна речовина

ПААГ – поліакриламідний гель

ПК – пірогенний кремнезем

СМС – суха молочна сироватка

ТЕМ – трансмісійна електронна мікроскопія

EDX – енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія

FTIR – інфрачервона спектроскопія Фур'є

SCS – індекс чутливості до налипання та злежування

SDS-PAGE – електрофорез у поліакриламідному гелі за умов денатурації

SEM – скануюча електронна мікроскопія

Tg – температура склування (glass transition temperature)

ζ – електрокінетичний потенціал

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку харчових технологій все більшої уваги приділяється використанню нанотехнологій для інтенсифікації процесів, підвищення якості та безпечності продуктів. Наноматеріали, зокрема наночастинки оксидів металів, відкривають нові можливості в харчовій промисловості завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям. Діоксид кремнію (SiO_2) та оксид цинку (ZnO) належать до найбільш поширених наноматеріалів, дозволених до застосування у харчових продуктах: SiO_2 відомий як добавка E551 (добавка-антиконсолідант), а сполуки цинку використовуються для збагачення продуктів цим есенціальним мікроелементом. Водночас залишається актуальним наукове обґрунтування безпечності та ефективності нанодобавок у конкретних харчових технологіях, особливо з урахуванням необхідності дотримання нормативних вимог і довіри споживачів до новітніх харчових інгредієнтів.

Однією з важливих задач молочної промисловості є комплексна переробка молока та забезпечення найбільш повного використання вторинної сировини - сироватки молочної, що містить цінні сироваткові білки, лактозу та мінеральні речовини. Обсяги перероблення сироватки молочної підсирної навіть в несприятливі для промисловості воєнні роки є задовільними, тоді як перероблення сироватки молочної кислої стримується рядом технічних і технологічних причин. Ця проблема є найбільш актуальною для операторів ринку малої і середньої потужності та ремісничого виробництва, для яких перероблення сироватки скоріше виклик, аніж економічно привабливий напрям. Сучасна тенденція розвитку промисловості ґрунтується на економічних і екологічних пріоритетах, які

спонукають операторів ринку до максимально повного промислового перероблення сироватки молочної.

Пошук технологічних рішень для ефективного використання сироватки молочної, перетворення її на функціональну основу для нових харчових продуктів є актуальним завданням та відповідає світовим трендам ресурсоощадного виробництва та циркулярної економіки. Перспективним підходом до вирішення зазначених проблем є застосування наночастинок SiO_2 та ZnO у процесах оброблення та перероблення сироватки молочної.

Наночастинки пірогенного кремнезему (SiO_2), завдяки великій питомій поверхні та адсорбційній здатності, можуть слугувати ефективним адсорбентом для видалення небажаних компонентів із рідкої сироватки, сприяючи її освітленню та підвищенню стабільності. Крім того, пірогенний кремнезем, що складається з наночастинок діоксиду кремнію, потенційно гарантуватиме стабілізацію показників якості сухої сироватки молочної та концентратів на її основі під час зберігання та транспортування.

Наночастинки ZnO , зі свого боку, можуть слугувати джерелом легкозасвоюваного цинку. До того ж, як відомо, цинк є кофактором для ряду ферментів та стимулює ріст корисної мікрофлори, тому використання наноформ цинку в технологіях ферментації сироватки молочної є перспективним напрямом. Однак, при цьому необхідно гарантувати відсутність токсичного впливу наночастинок на організм людини, зокрема дослідити їх взаємодію з білками та клітинами.

Науково обґрунтоване застосування наночастинок SiO_2 та ZnO в технології харчових продуктів на основі сироватки молочної дозволить підвищити якість готової продукції, розширити її асортимент за рахунок функціональних властивостей, а також забезпечити екологічні та економічні переваги. Актуальність роботи посилюється зокрема й процесом євроінтеграції України, у межах якого гармонізація діяльності харчових виробництв з принципами Європейського зеленого курсу та положеннями

директив ЄС щодо нефінансової звітності (CSRD) набуває особливої важливості. Впровадження екологічно безпечних та ресурсоефективних харчових технологій розглядається як ключова передумова адаптації національного бізнесу до нових регуляторних вимог Європейського Союзу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано у Національному університеті харчових технологій у межах тематик держбюджетних науково-дослідних робіт «Наукове обґрунтування ресурсоефективних технологій харчових продуктів, збагачених поліфункціональними інгредієнтами» (0120U102556, 2020-2022 р.р.) та «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефективних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив продовольчої безпеки» (0123U102060, 2023-2025 р.р.). Тематики дослідження узгоджуються з науковими пріоритетами університету в галузі створення екологічно безпечних і функціонально орієнтованих харчових технологій на основі вторинної молочної сировини, а також зосереджені на розробленні технологічних рішень для забезпечення продовольчої безпеки шляхом залучення інноваційних наноматеріалів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності застосування наночастинок SiO_2 та ZnO в технології харчових продуктів на основі сироватки молочної та розроблення технологічних рішень для підвищення ефективності використання молочної сироватки. Для досягнення поставленої мети були визначені такі основні завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасний стан розвитку нанотехнологій у харчовій промисловості та досвід використання наноматеріалів, зокрема SiO_2 та ZnO , у технологіях харчових продуктів; оцінити потенціал і ризики застосування наночастинок у харчових продуктах.

- На основі аналізу літературних даних та попередніх досліджень обґрунтувати вибір нанодисперсного діоксиду кремнію та наночастинок

оксиду цинку як об'єктів дослідження для вирішення технологічних задач оброблення та перероблення сироватки молочної.

- Дослідити адсорбційні та сорбційні властивості пірогенного кремнезему (SiO_2) по відношенню до білків сироватки молочної та радіоізоотопу ^{137}Cs ; обґрунтувати вибір типу пірогенного кремнезему (гідрофільний, гідрофобний, питома поверхня), встановити раціональні параметри адсорбційного очищення сироватки від білка (дозування адсорбенту, температура, тривалість обробки).

- Вивчити доцільність застосування пірогенного SiO_2 в якості добавки-антиконсоліданту для сухої молочної сироватки; визначити раціональну концентрацію нанодобавки, що забезпечує зменшення злежування порошку при зберіганні, не погіршуючи його якісних показників.

- Визначити функціонально-технологічні властивості частинок оксиду цинку, отриманих електроіскровим диспергуванням гранул металу, дослідити вплив наночастинок ZnO на процес ферментування сироватки молочної; обґрунтувати доцільність використання ферментованої сироватки, збагаченої цинком, в технологіях харчових продуктів на основі сироватки молочної; дослідити цитотоксичні та біологічні ефекти ZnO , зокрема взаємодію з білками та вплив на показники бактерицидної активності клітин, з метою оцінки безпечності застосування наночастинок ZnO в харчовій промисловості.

- На основі проведених досліджень розробити технологічні рішення щодо застосування наночастинок SiO_2 та ZnO у процесах оброблення і перероблення молочної сироватки; розробити апаратурно-технологічну схему освітлення сироватки молочної пірогенним кремнеземом та оцінити ефективність її використання в промислових умовах; визначити можливості подальшого використання обробленої сироватки у виробництві харчових продуктів на основі сироватки молочної.

- Провести апробацію запропонованих технологічних рішень щодо використання наночастинок кремнію і цинку в умовах виробництва та узагальнити соціально-екологічні переваги запропонованих рішень для молокопереробної галузі; формалізувати рекомендації щодо впровадження отриманих результатів у виробництво та освітній процес.

Об'єкт дослідження: спосіб очищення сироватки молочної від білка та радіонуклідів внаслідок використання пірогенного кремнезему з вмістом НЧ кремнію; інтенсифікація процесу ферментування сироватки молочної, збагаченої НЧ ZnO; технології сиру м'якого термокислотного зсідання та хліба житньо-пшеничного, із використанням сироватки ферментованої кислоти, збагаченої НЧ цинку.

Предметом дослідження є: сироватка молочна, гідрофільний і гідрофобний пірогенний кремнезем з різною питомою поверхнею, наночастинки ZnO, білки сироватки молочної, сироватка молочна суха, сир м'який термокислотного зсідання, хліб житньо-пшеничний, показники технологічного процесу та якість готових продуктів, мінеральний склад сироватки молочної, дисперсні характеристики колоїдного розчину цинку, антизлежувальні властивості, стабільність показників якості сухої молочної сироватки з пірогенним кремнеземом, цитотоксичність наночастинок ZnO.

Методи досліджень. У процесі виконання дисертаційної роботи застосовувалися загальноприйняті та спеціалізовані методи дослідження, зокрема фізико-хімічні, електрофоретичні та мікроскопічні.

Математичну обробку результатів здійснювали методами дисперсійного аналізу з використанням критерію Стьюдента та побудовою моделей за методологією поверхні відгуку. Розрахунки виконувалися з використанням програм Microsoft Excel та математичного пакета MathCad.

Наукова новизна одержаних результатів

Запропоновано спосіб освітлення сироватки молочної від білка шляхом використання природного адсорбента - пірогенного кремнезему, що складається з наночастинок діоксиду кремнію.

На підставі комплексу експериментальних досліджень **вперше** вивчено закономірності та встановлено впливові чинники на ступінь адсорбції білка сироватки молочної за використання пірогенного діоксиду кремнію в якості адсорбенту, серед яких питома поверхня кремнезему, концентрація адсорбенту в середовищі, температура процесу, тривалість обробки, а також інтенсивність перемішування, що забезпечує повний контакт фаз.

Математичним моделюванням процесу адсорбції білка **вперше** встановлено раціональні параметри адсорбційного освітлення сироватки молочної, зокрема значення концентрації адсорбенту, температури, тривалості контакту фаз, а також характеристики наноматеріалу, що забезпечують максимальну ефективність процесу. Доведено, що при внесенні 1,5 % гідрофільного нанодисперсного SiO_2 з питомою поверхнею $\sim 300 \text{ м}^2/\text{г}$, за температури $45 \text{ }^\circ\text{C}$ та інтенсивного перемішування протягом 40 хв досягається видалення до 50...55 % білків.

Вперше порівняльним електрофоретичним аналізом фракційного складу білків сироватки молочної до та після адсорбційної обробки пірогенним кремнеземом визначено відносний вміст білкових фракцій у діапазоні молекулярних мас 25...80 кДа та встановлено, що ступінь вилучення основних білкових компонентів (β -лактоглобулін, α -лактальбумін, лактоферин, сироватковий альбумін) становить 65...71% незалежно від їх молекулярної маси. Це свідчить про відсутність вираженої селективності наночастинок SiO_2 щодо окремих білкових фракцій та вказує на провідну роль неспецифічних механізмів зв'язування — водневих,

електростатичних та гідрофобних взаємодій, за участі ізоелектричних точок та просторових характеристик білкових молекул.

Вперше встановлено збагачення освітленої сироватки молочної кремнієм у результаті її обробки пірогенним кремнеземом, а саме: концентрація елементного кремнію зростає з 2,12 мг/дм³ до 205,72 мг/дм³. Отримані дані послужили підставою для обґрунтування шляхів використання освітленої сироватки молочної та білково-мінерального концентрату, одержаного внаслідок адсорбції білка пірогенним кремнеземом, в технологіях функціональних харчових продуктів із підвищеним вмістом біологічно активного кремнію.

Подальшого розвитку набули експериментальні дослідження антизлежувальних властивостей пірогенного кремнезему вітчизняного виробництва ТМ “Орісіл” з питомою поверхнею 300 м²/г, та його сорбційної здатності по відношенню до радіоізоотопу ¹³⁷Cs. Встановлено, що введення 1 % кремнезему до сироватки молочної знижує ступінь злежування сухого продукту до <8 %, а в рідкій фазі забезпечує сорбцію до 34,6 % радіоізоотопу ¹³⁷Cs.

Подальшого розвитку набули уявлення про дисперсні характеристики, морфологію та елементний склад цинквмісних частинок, одержаних шляхом електроіскрового диспергування металу, про ступінь збагачення цинком у 1,3...3,0 рази та фізико-хімічні показники сироватки молочної залежно від тривалості електроіскрового оброблення.

Вперше науково обґрунтовано доцільність використання нанодисперсного ZnO, синтезованого безпосередньо в середовищі сироватки молочної методом електроіскрового диспергування металу, як функціонального інгредієнта, що активує ферментаційні процеси та скорочує тривалість ферментації з 32±1 до 17±1 год. Обґрунтовано ефективність практичного застосування сироватки молочної кислоти,

збагаченої цинком, у технологіях м'якого сиру термокислотного зсідання як коагулянта та житньо-пшеничного хліба як натурального підкислювача.

Уперше здійснено комплексну оцінку біобезпеки наночастинок оксиду цинку, синтезованих методом електроіскрового диспергування у середовищі сироватки молочної в порівняльному аспекті з сіллю $ZnSO_4$:

- встановлено, що концентрації 0,014; 0,007 і 0,004 мг/см³ наночастинок ZnO не мали суттєвого впливу на структуру білків плазми крові;
- визначено бактерицидну активність наночастинок ZnO методом НСТ-тесту в макрофагах щурів *in vitro*.

Практичне значення отриманих результатів.

За результатами експериментальних досліджень розроблено і науково обґрунтовано раціональні параметри адсорбції білків сироватки молочної пірогенним кремнеземом. Запропоноване рішення було апробовано в промислових умовах на виробництві ТОВ «Галіївський маслозавод». Доведено задовільну сорбційну здатність НЧ кремнію щодо радіоізоотопу ¹³⁷Cs. Комплексом експериментальних досліджень доведено антизлежувальні властивості гідрофільного пірогенного кремнезему з питомою поверхнею 300 м²/г.

На основі експериментальних досліджень розроблено технологію збагачення кислої сироватки молочної наночастинами цинку (ZnO) перед ферментацією, що дозволяє інтенсифікувати біохімічні процеси сквашування. Запропонована технологія була апробована на ТОВ «Галіївський маслозавод».

Спосіб виробництва хліба житньо-пшеничного з використанням сироватки молочної ферментованої кислої, збагаченої наночастинами цинкоксиду, було апробовано у виробничих умовах ФОП «Білохатнюк Володимир Олександрович».

Результати досліджень імплементовано у навчальний процес кафедр технології молока і молочних продуктів та технології хлібопекарських і кондитерських виробництв Національного університету харчових технологій (м. Київ).

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійної наукової роботи автора. Дисертантом здійснено аналіз сучасної науково-технічної літератури за обраною тематикою, самостійно сплановано та виконано експериментальні дослідження, проведено статистичну обробку результатів, а також їх теоретичне обґрунтування, опис та інтерпретацію.

Формування основних напрямів дослідження, підготовка наукових публікацій, обговорення та узагальнення результатів, а також їх промислова апробація проводились за активної участі наукового керівника — доктора технічних наук, професора кафедри технології молока і молочних продуктів НУХТ Кочубей-Литвиненко О. В.

Пробопідготовка сироватки молочної перед адсорбцією пірогенним кремнеземом проводились спільно із завідувачем ПНДЛ НУХТ, к.т.н., с.н.с. Мариніним А.І. Математичне моделювання даних та оптимізацію виробничих параметрів проведено спільно з доц., к.т.н. Бреус Н.М.

Дослідження дисперсних характеристик колоїдних розчинів цинку та їх фізико-хімічних характеристик проводилися спільно із здобувачем ОНС “Доктор філософії” Дубівко А.С. та к.т.н., с.н.с. Мариніним А.І.

Цитотоксичність наночастинок оксиду цинку визначалася спільно із здобувачем ОНС “Доктор філософії” Дубівко А.С. та завідувачкою лабораторії промислової токсикології і гігієни праці при використанні хімічних речовин Інституту медицини праці імені Ю.І. Кундієва НАМН України, д.б.н., с.н.с. Дмитрухою Н.М.

Дослідження доцільності використання кислої сироватки молочної, збагаченої наночастинами цинку, в технології житньо-пшеничного хліба

проводилися спільно з професором кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів, к.т.н. Білик О.А.

Експериментальну частину дисертаційної роботи виконано у лабораторіях кафедр технології молока і молочних продуктів, технології хлібопекарських і кондитерських виробів та проблемної науково-дослідної лабораторії НУХТ, на кафедрі технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства НУБіП, на базі Інституту біохімії імені О.В. Палладіна НАН України та Інституту медицини праці імені Ю.І. Кундієва НАМН України, в науково-дослідній лабораторії ТОВ “Nanomedtech”, лабораторії ДП "Державний центр сертифікації і експертизи сільськогосподарської продукції", Державна установа "Центр громадського здоров'я Міністерства охорони здоров'я України" та виробничій лабораторії ТОВ "Галіївський маслозавод".

Особистий внесок здобувача підтверджується опублікованими матеріалами та документами.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наукових форумах різного рівня. Зокрема, проведено апробацію матеріалів дослідження на науково-технічних конференціях: I Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні» (м. Київ, 2021), 88-ма Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, 2022), II Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні» (м. Київ, 2023), Міжнародна науково-практична конференція “Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу” (м. Київ, НУБіП, 2023), IV Міжнародна науково-

практична конференція “Сучасні тренди і перспективи в галузі переробки м’яса і молока” (м. Київ, 2023), Всеукраїнська науково-практична конференція «Молочна промисловість від виробника до споживача: сучасні тренди та орієнтири» (м. Київ, 2024), XXIX Міжнародна науково-практична конференція “Business Culture in the Conditions of Socio-Cultural Transformation of Society”, III Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти реформування системи публічного управління в умовах воєнного часу» (м. Переяслав, 2024) (м. Ліон, Франція, 2024), XIII Міжнародна науково-технічна конференція “Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції” (м. Київ, 2024), 91-ша Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (м. Київ, 2025).

Публікації автора за темою дисертації. Основні положення та результати дисертації опубліковано у 17 наукових публікаціях, з них 5 статей оприлюднено у фахових наукових виданнях України (у тому числі 1 – у міжнародному журналі, що входить до наукометричної бази Scopus) та 12 тез доповідей у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 192 сторінках основного тексту, містить 24 таблиці та 27 рисунків. Структура роботи включає зміст, перелік умовних скорочень, вступ, п’ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки.

РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1 Світовий досвід застосування нанотехнологій у промисловості.

Нанотехнології є однією з ключових інноваційних платформ XXI століття, які відкривають нові можливості у промисловості загалом, медицині, фармацевтиці та харчовій промисловості. Зокрема, завдяки зміні фізико-хімічних властивостей речовин у наномасштабі (1–100 нм) з'являється широкий спектр перспектив для їхнього використання (Hussain & Mishra, 2018).

Ідея нанотехнологій вперше була запропонована фізиком Річардом Фейнманом у 1959 році у лекції “There’s Plenty of Room at the Bottom”, а сам термін «нанотехнологія» вперше використав Норіо Танігучі у 1974 році. Вже з 1980-х років нанотехнології стали одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень, а їхній світовий ринок стрімко зростає. За оцінками, глобальна ринкова вартість нанотехнологій у 2023 році перевищила 3 трильйони доларів США, і очікується подальше зростання (Handford et al., 2014).

Один із ключових аспектів розвитку нанотехнологій — це створення та використання наноматеріалів, які є основою багатьох інновацій у цій сфері. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, вони знаходять застосування в медицині, електроніці, енергетиці та харчовій промисловості. Розуміння структури та характеристик наноматеріалів, зокрема наночастинок, є важливим для оцінки їхнього потенціалу та безпечного використання.

Наноматеріал визначається як будь-який матеріал, що має принаймні один або більше вимірів у нанорозмірному діапазоні, тоді як наночастинка є дискретною одиницею, яка має всі три виміри у цьому діапазоні (Food and

Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization, 2010), тобто наночастинка є конкретним видом наноматеріалу розміром від 1 до 100 нм, тоді як наноматеріали можуть мати складнішу структуру та включати різні нанорозмірні елементи.

Наноматеріали можна розділити на наступні категорії:

- Природні (біогенні). Наноматеріали, які утворюються в природі без втручання людини.
- Синтетичні. Наноматеріали, які виробляються хімічними або фізичними методами без чіткої орієнтації на функціональність.
- Інженерні. Наноматеріали, які цілеспрямовано створюються для досягнення певних властивостей або функцій.

У промислових застосуваннях основну увагу приділяють саме інженерним наноматеріалам, враховуючи можливість їх цільової модифікації для покращення певних характеристик і надання їм унікальних властивостей. Залежно від їхнього хімічного складу та структури, вони можуть бути органічними, неорганічними або композитними.

Органічні наночастинки, такі як полімерні мікрокапсули та ліпосоми, активно використовуються у фармацевтиці та харчовій промисловості для інкапсуляції біологічно активних речовин, що забезпечує їхню захищеність та контрольоване вивільнення (Tamjidi et al., 2013).

Неорганічні наноматеріали, зокрема наночастинки металів та оксидів металів, мають широкий спектр застосувань завдяки своїм унікальним оптичним, антимікробним та бар'єрним властивостям (Egger et al., 2009).

Композитні наноматеріали поєднують властивості різних класів наночастинок, що дає змогу створювати матеріали з високими механічними та захисними характеристиками (Rhim et al., 2013).

Використання інженерних наноматеріалів дозволяє суттєво покращити властивості матеріалів і продукції у різних галузях. Однією з ключових переваг нанотехнологій є можливість створення матеріалів із

підвищеною механічною міцністю. Додавання наночастинок до полімерних матриць або харчових структур дозволяє покращити їхню стабільність і стійкість до зовнішніх впливів. Наприклад, дослідження Handford et al. (2014) показують, що включення наночастинок кремнезему до складу молочних продуктів дозволяє змінювати реологічні властивості білкових структур, підвищуючи їхню стійкість до механічних навантажень.

Ще одним важливим аспектом є антимікробні властивості наночастинок. Відомо, що наночастинки срібла, цинку та діоксиду титану здатні пригнічувати розвиток патогенних мікроорганізмів за рахунок генерації активних форм кисню, які руйнують клітинні мембрани бактерій (Wu et al., 2014). Ця властивість робить їх особливо перспективними для використання в харчовій промисловості, адже додавання таких наночастинок до упаковки або харчових продуктів дозволяє знизити рівень мікробного забруднення та продовжити термін зберігання продукції (Egger et al., 2009).

Окрім цього, наночастинки значно покращують бар'єрні властивості пакувальних матеріалів. Дослідження Rhim et al. (2013) довели, що включення наночастинок у полімерні упаковки дозволяє зменшити проникність кисню, вологи та світла, що є критично важливим для збереження якості продуктів. Подібні технології використовуються у створенні “розумного пакування”, яке може реагувати на зміни складу газового середовища всередині упаковки або навіть змінювати колір залежно від стану продукту.

Значний інтерес викликає також застосування нанотехнологій для оптимізації харчових структур. Дослідження Sun et al. (2021) свідчать, що наночастинки можуть впливати на фізико-хімічні властивості харчових продуктів, покращуючи їхню текстуру, в'язкість та стабільність. Наприклад, використання нанокремнезему дозволяє покращити дисперсність білкових структур у молочних продуктах, що сприяє

зменшенню агрегації білкових молекул під час тривалого зберігання. Аналогічно, використання нанорозмірних жирів дає змогу створювати низькокалорійні продукти без втрати їхніх сенсорних характеристик (Biswas et al., 2022).

Нанотехнології сьогодні активно застосовуються у фармацевтиці, сільському господарстві, енергетиці, косметології та харчовій промисловості.

У фармацевтичній сфері вони використовуються для створення ефективних систем доставки лікарських препаратів, що дозволяє знизити дозування лікарських речовин і покращити їхню біодоступність (Roop & Patel, 2020).

У сільському господарстві наночастинки застосовуються для створення новітніх добрив та засобів захисту рослин, які мають контрольоване вивільнення активних компонентів, що сприяє їх більш ефективному використанню (Abobatta, 2018).

В енергетиці наноматеріали знаходять своє місце у створенні новітніх сонячних панелей та акумуляторних батарей із покращеними характеристиками (Sethi et al., 2011).

У косметології нанотехнології використовуються для створення засобів догляду за шкірою, що містять наночастинки діоксиду титану або цинку, які забезпечують захист від ультрафіолетового випромінювання (Kaul et al., 2018).

Однак найбільший інтерес у рамках цього дослідження становить використання нанотехнологій саме у харчовій промисловості, адже вони відкривають нові можливості для покращення текстурних, мікробіологічних і сенсорних характеристик продуктів, а також сприяють збільшенню їхнього терміну зберігання (Handford et al., 2014).

Глобальний розвиток нанотехнологій демонструє їхній потенціал для різних галузей, особливо для харчової промисловості. Зважаючи на

унікальні властивості наноматеріалів, їх використання може суттєво змінити сучасні технології виробництва та зберігання харчових продуктів. Проте ефективне впровадження нанокomпонентів у харчові технології вимагає детального аналізу їхньої безпечності, біодоступності та впливу на організм людини. Тому в наступному розділі буде розглянуто обґрунтування необхідності та перспективи застосування наночастинок у харчовій промисловості, зокрема їхній вплив на харчові продукти, технологічні процеси та кінцевих споживачів.

1.2 Обґрунтування необхідності та перспективи застосування нанокomпонентів у харчовій промисловості.

Застосування нанотехнологій у харчовій промисловості є одним із найбільш перспективних напрямів сучасної науки, що відкриває можливості для покращення якості продуктів, їхньої стабільності та безпечності. Наноматеріали дозволяють модифікувати фізико-хімічні властивості харчових продуктів, покращувати їхню текстуру, збільшувати термін зберігання та навіть контролювати їхній склад у режимі реального часу (Handford et al., 2014).

Необхідність застосування нанокomпонентів у харчовій промисловості зумовлена кількома ключовими факторами. По-перше, зростає попит на продукти із покращеними функціональними характеристиками, зокрема на молочні вироби, які мають збережену структуру білків, високу стабільність та тривалий термін зберігання. По-друге, все більшої актуальності набувають питання мікробіологічної безпеки харчових продуктів. У зв'язку з цим розробка антимікробних покриттів для упаковки та безпечних нанодобавок, що пригнічують розвиток патогенних мікроорганізмів, є важливим напрямом сучасних досліджень (Wu et al., 2014).

Харчова промисловість постійно стикається з проблемами, пов'язаними з якістю, безпечністю та терміном зберігання продукції. Використання традиційних методів консервації не завжди дозволяє ефективно запобігати розвитку мікроорганізмів і окислювальним процесам, що призводять до втрати якості продукту. Дослідження Kaul et al. (2018) показують, що впровадження наночастинок металів, таких як ZnO та Ag, у пакувальні матеріали дозволяє значно зменшити ризик бактеріального забруднення продуктів без необхідності використання хімічних консервантів.

Крім мікробіологічної стабільності, важливою проблемою є збереження структури харчових продуктів під час зберігання. Зокрема, в молочній промисловості однією з головних технологічних проблем є агрегація білків під час тривалого зберігання, що призводить до зміни консистенції продукту. Додавання наночастинок кремнезему, як було продемонстровано в дослідженнях Biswas et al. (2022), дозволяє зменшити агрегацію білків та покращити стабільність молочних продуктів за рахунок їхньої взаємодії з поверхнею наночастинок.

Окрім необхідності впровадження нанотехнологій у харчову промисловість, не менш важливим є аналіз їхніх перспектив. Останні наукові розробки свідчать про значний потенціал наноконпонентів у таких аспектах:

Таблиця 1.1 – Напрями та приклади застосування нанотехнологій в харчовій промисловості.

Напрямок застосування	Приклад застосування
Наносенсори для моніторингу та контролю безпечності харчової продукції	Застосування наночастинок золота (AuNPs) для визначення афлатоксину M1 (AFM1) у молоці (Hamad, Han, Kim,

	& Rather, 2018).
Smart - упаковка, що сприяє збереженню якості харчових продуктів	Додавання наночастинок срібла (AgNPs) до біополімерних харчових плівок (Rhim, Park, & Ha, 2013).
Нанодобавки для збагачення харчових продуктів, покращення їхніх якісних характеристик і подовження терміну зберігання.	Додавання каротиноїдів у фруктові напої, забезпечуючи їх покращену біодоступність (Ravichandran, 2010).
Наноматеріали для створення ефективних систем доставки поживних речовин (Nutrient Delivery Systems, NDS)	Застосування наноструктурованих ліпідних носіїв (NLC) для інкапсуляції омега-3 жирних кислот, що зменшило їх окиснення (Tamjidi, Shahedi, Varshosaz, & Nasirpour, 2013).
Адсорбція окремих компонентів із сировини наночастинками.	Застосування синтезованого оксид графену (OG) з фенілетиламіном для видалення пестицидів із фруктів, овочів та води (Arabmofrad et al. 2020).

Олішевський, Маринін, Дашковський, Ткаченко і Щербаков (2011) підтвердили антимікробну активність препаратів наночастинок металів (ПНМ) Ag, Au і CeO₂ у низьких концентраціях (0,5–7,5 мг/л) проти чистих культур мікроорганізмів *Escherichia coli* IEM-1, *Bacillus subtilis* БТ-2 і *Saccharomyces cerevisiae* ОБ-3. Було виявлено, що комбіноване використання ПНМ Ag з ПНМ Au посилює антимікробну дію в 10–100 разів відносно чистих культур *B. subtilis* БТ-2 та *S. cerevisiae* ОБ-3. Крім того,

встановлено пролонговану антимікробну дію ПНМ Ag на мікрофлору непастеризованого пива, що виражається у зниженні бактеріальної мікрофлори на 16 % та дріжджової – на 41 % після 504 год (21 доба) експозиції.

Існує ряд досліджень відносно можливості застосування біоактивних мінеральних елементів в якості нанодобавок. У статті Pereira, Bruggraber, Faria, Roots, Tagmount, Aslam і Powell (2014) було підтверджено, що наночастинки Fe(III) можуть бути ефективною та безпечною альтернативою традиційним залізовмісним препаратам, що відкриває нові перспективи для лікування таких захворювань як залізодефіцитна анемія.

Дослідження Kim, Lee, Jo, Kim, Kim, Oh і Choi (2015) показало, що наночастинки CaCO₃ демонструють вищий рівень цитотоксичності порівняно з макрочастинками через підвищену генерацію активних форм кисню (ROS) та пошкодження клітинної мембрани. Водночас, наночастинки краще засвоюються клітинами завдяки енергійно-залежному ендоцитозу та ефективно транспортуються через кишкові мікрофолди (M-клітини). Проте загальна біодоступність CaCO₃ незалежно від розміру частинок залишалася низькою, що вказує на те, що часткове розчинення у шлунковому середовищі є критичним фактором засвоєння кальцію.

У цукровій промисловості дослідження із застосування наночастинок проводили науковці Національного університету харчових технологій. Українець та ін. (2015) досліджували можливість застосування ультрадисперсних сполук алюмінію для коагуляційного очищення жомопресової води. Застосування реагенту на основі гелю алюмінію сприяло зниженню вмісту білкових і пектинових сполук у жомопресовій воді на 50 % та 70 % відповідно, а також підвищило ефективність її очищення до 23 %.

У роботі Ткаченко (2014) було встановлено, що оптимальна доза гідроксиду алюмінію в нанорозмірному стані для додаткового очищення дифузійного соку становить 0,0002–0,0004 % $\text{Al}(\text{OH})_3$ від маси соку.

Олішевський та ін. (2016) дослідили можливість використання нанокompозиту алюмінію в процесі екстрагування сахарози з бурякової стружки в умовах цукрового виробництва та встановили, що введення нанокompозиту алюмінію в жомопресову воду у кількості 0,0005 % від її маси сприяє підвищенню чистоти дифузійного соку на 2,0 % та чистоти жомопресової води на 7,3 %.

Сучасні дослідження також демонструють потенціал використання наночастинок для створення нових видів харчових продуктів, таких як низькокалорійні продукти з покращеними смаковими якостями або харчові добавки із збалансованим складом мікроелементів. Наприклад, використання нанорозмірної солі дозволяє зменшити її кількість у продуктах без втрати інтенсивності солоного смаку, що сприяє зниженню споживання натрію, або ж використання наноемульсій, що дозволяють приховувати небажані смаки та покращувати відчуття кремової текстури та дає змогу розробляти продукти зниженої жирності (Sun et al., 2021).

Розвиток нанокompозитних матеріалів сприяє покращенню характеристик харчової упаковки, зокрема її міцності, бар'єрних властивостей, антимікробної активності, а також стійкості до високих і низьких температур (Saffarionpour, 2019).

Одним із підходів є включення наночастинок глини до кополімеру етилен-вінілового спирту та біополімеру молочної кислоти, що значно покращує бар'єрні властивості до кисню (Doyle, 2006).

Даний огляд підтверджує, що нанотехнології мають значний потенціал застосування у харчовій промисловості, сприяючи покращенню сенсорних характеристик харчових продуктів та створенню більш здорових альтернатив. Вони застосовуються для моніторингу безпеки харчових

продуктів, подовження терміну їх зберігання, покращення якості та засвоюваності поживних речовин, а також для контролю та модифікації складу сировини. Зокрема, наночастинки використовуються в інтелектуальних пакувальних матеріалах, ефективних системах доставки поживних речовин, а також у процесах адсорбції небажаних компонентів. Водночас, для безпечного впровадження цих технологій необхідні подальші дослідження щодо їхнього довгострокового впливу на організм людини.

Зважаючи на необхідність і перспективи використання нанотехнологій у харчовій промисловості, особливий інтерес викликає їхнє застосування саме у виробництві молочних продуктів. Оскільки молочна промисловість є однією з найдинамічніших галузей, що потребує новітніх технологічних рішень для покращення стабільності, мікробіологічної безпеки та сенсорних характеристик продукції, наступний розділ буде присвячено аналізу можливостей застосування наночастинок у молочній промисловості.

1.3 Перспективи застосування наночастинок у молочній промисловості

Сучасні тенденції розвитку молочної промисловості диктують необхідність впровадження новітніх технологій, здатних покращити якість продукції, підвищити її безпечність та збільшити термін зберігання. Використання наночастинок у молочному виробництві відкриває нові можливості для оптимізації технологічних процесів, покращення реологічних властивостей продуктів та забезпечення їхньої мікробіологічної стабільності. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним характеристикам наноматеріали можуть ефективно взаємодіяти з білковими структурами, жировими компонентами та мінералами молока, що дозволяє модифікувати його функціональні властивості (Handford et al., 2014).

Однією з основних проблем у молочній галузі є схильність білкових систем до агрегації, що призводить до погіршення текстури та сенсорних характеристик кінцевого продукту. Додавання наночастинок пірогенного кремнезему дозволяє стабілізувати білкові емульсії, перешкоджаючи утворенню небажаних агрегатів під час зберігання. Дослідження Biswas et al. (2022) показали, що взаємодія білків із наночастинами кремнезему сприяє рівномірному розподілу білкових молекул у середовищі, що підвищує стабільність молочних емульсій. Це особливо важливо для йогуртів, молочних напоїв та десертних виробів, де критичною є однорідність текстури.

Окрім стабілізації білків, наночастинки можуть позитивно впливати на гомогенізацію молочних продуктів. Зокрема, використання наночастинок оксиду цинку дає змогу змінювати поверхневий натяг жирових глобул, покращуючи їхню дисперсію у молочних системах. Це дозволяє створювати більш стабільні емульсії з покращеними реологічними характеристиками, що може бути корисним при виробництві вершкових продуктів та рослинно-молочних замінників (Wu et al., 2014).

Не менш важливим є підвищення мікробіологічної безпеки молочних продуктів, що залишається одним із ключових завдань харчової промисловості. Використання наночастинок срібла, міді та цинку дозволяє ефективно пригнічувати розвиток патогенних мікроорганізмів, зокрема *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* та *Salmonella* spp. Дослідження Олішевського та ін. (2011) підтвердили, що навіть низькі концентрації наночастинок металів можуть забезпечувати значний антимікробний ефект. Особливо перспективним є комбіноване застосування наночастинок, наприклад, срібла та оксиду цинку, що дозволяє отримати синергетичний ефект та значно знизити необхідну концентрацію нанодобавок у продуктах.

Окрім антимікробної дії, наночастинки можуть бути використані для створення активних пакувальних матеріалів, здатних змінювати свої

властивості у відповідь на вплив навколишнього середовища. Сучасні нанокompatитні плівки на основі полімерів із включенням наночастинок металів демонструють значно кращі бар'єрні характеристики, що запобігає проникненню кисню та вологи, а отже, зменшує швидкість псування молочних продуктів (Saffarionpour, 2019). Використання таких матеріалів є перспективним для пакування сиру, кисломолочних продуктів та ультрапастеризованого молока, адже вони забезпечують не тільки захист, а й пролонговану антимікробну дію.

Перспективним напрямом є також використання наноматеріалів у функціональних молочних продуктах. Наприклад, дослідження Pereira et al. (2014) показали, що наночастинки Fe(III) можуть бути ефективним джерелом заліза у збагачених молочних напоях, забезпечуючи високу біодоступність та мінімальний металевий присмак. Аналогічно, наночастинки кальцію можуть бути використані у виробництві йогуртів та молочних напоїв для підвищення їхньої поживної цінності без необхідності використання неорганічних солей кальцію, які часто мають гіркий присмак.

Значну увагу також привертає застосування наноемульсій та наноліпосом у молочних продуктах. Використання наноструктурованих жирів дозволяє створювати знежирені або низькокалорійні продукти зі збереженням кремоподібної текстури, що є важливим для виробництва дієтичного морозива, сметани та сирних кремів (Sun et al., 2021). Крім цього, наноліпосоми можуть використовуватися для інкапсуляції біологічно активних сполук, таких як пробіотики або жиророзчинні вітаміни, що підвищує їхню стабільність та ефективність у складі молочних продуктів.

Харчова індустрія стикається, також, і з численними екологічними викликами, серед яких однією з головних проблем є значні обсяги стічних вод. Ключовою галуззю, яка в силу специфіки виробництва має опікуватися

очищенням стічних вод та шукати шляхи вирішення даної проблематики є молокопереробна промисловість, в першу чергу, її сироварна галузь.

Однією з серйозних проблем молочної промисловості є неконтрольовані викиди сироватки молочної, що залишається після переробки молока на сир кисломолочний, сир сичужний тощо. Сироватка представляє значну екологічну загрозу. По-перше, обсяг сироватки молочної становить 80...90 % від об'єму переробленого молока на сироварних підприємствах, що є відчутним. По-друге, її біохімічний попит на кисень (БПК) може сягати 70-80 тисяч мг/дм³, в той час як БПК загального стоку (без сироватки) становить приблизно 3 тисячі мг/дм³. Є відомості про те, що 1 м³ молочної сироватки, "скинутий" в стічні води, забруднює водойми настільки, як й 100 м³ побутових стічних вод (Яценюк, Семенова & Решетняк, 2017).

Витрати на очищення сироватки, яку зливають в каналізацію молокозаводи, еквівалентні витратам на очищення міських стічних вод. Для вирішення цієї екологічної проблеми необхідно нарощувати обсяги сироватки, яка використовується як основна або допоміжна сировина під час виготовлення різноманітних харчових продуктів, наприклад сироваткових напоїв. Однак, реалії сьогодення молокопереробної промисловості в цілому світі такі, що зачасту вона не переробляється, а скидається разом із стічними водами у навколишнє середовище.

В той же час, слід розуміти, що у виробництві сироваткових напоїв однією з ключових проблем є наявність сироваткових білків. При нагріванні вони згортаються, утворюючи осад, що погіршує зовнішній вигляд напою. Крім того, ці білки можуть призвести до утворення накипу на обладнанні, що ускладнює виробництво та збільшує витрати.

Сучасні методи очищення сироватки, такі як мембранна фільтрація або ферментативне розщеплення, є досить дорогими. Тому існує потреба у більш доступних способах видалення білків, таких як кислотне осадження,

використання солей, термічна обробка або застосування наночастинок для адсорбції білків.

Застосування наночастинок для освітлення сироватки молочної не тільки зменшить витрати на виробництво, але й підвищить його рентабельність. Видалені білки можуть бути використані для виробництва цінних білкових концентратів, що відкриває додаткові можливості для отримання прибутку. Крім того, ефективне осадження білків сприятиме зменшенню забруднення стічних вод, що є важливим для екології.

Іншим прикладом застосування наночастинок в молочній промисловості є їх застосування для захисту молочних продуктів від мікроорганізмів і збільшення терміну придатності. Nazem, Shaala, і Awad (2024) дослідили застосування неорганічних металевих оксидних наночастинок для контролю *E. coli* у сирому молоці. Дослідження показали високу ефективність наночастинок оксидів металів (ZnO, MgO, CaO) у зниженні забруднення молока бактеріями *E. coli*. ZnO показав найкращі результати, особливо при холодному зберіганні.

Молоко і молочні продукти відносяться до харчових продуктів, які найбільш забруднені радіонуклідами. Поліщук (2023) зазначає, що вчені-радіологи з Ексетерського університету (Великобританія) та Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології встановили, що коров'яче молоко в окремих приватних господарствах за 200 км від ЧАЕС й досі несе в собі радіоактивний слід з часів аварії на ЧАЕС. Українські вчені, які вже 30 років ведуть радіаційні спостереження, стверджують, що проблема забруднення молока радіонуклідом цезію (^{137}Cs) існує лише в окремих регіонах зі специфічними ґрунтами.

У цьому контексті пошук шляхів зниження радіоактивного забруднення молочної сировини і, як наслідок, готової продукції, був і залишається актуальним навіть у віддалений період після аварії на

Чорнобильській АЕС та набуває нової сили актуальності через ризики пов'язані з окупацією Енергодарської АЕС.

Науковцями Національного університету харчових технологій (Хоменко, Олішевський, Кочубей-Литвиненко, Маринін & Білоник, 2014) було встановлено, що використання пірогенного кремнезему призводить до зниження питомої активності ^{137}Cs у незбираному молоці на 17–44 % залежно від його питомої поверхні та кількості внесення.

Запропонований спосіб передбачає додавання кремнезему до молочної сировини, його комплексоутворення з білками та “уловлювання” цим комплексом ^{137}Cs . Далі отриманий осад потребує видалення та утилізації. При цьому відмічено, що разом з отриманим ефектом сорбції ^{137}Cs спостерігається зниження показників молока, які визначають його харчову та біологічну цінність через зниження вмісту білка. З огляду на це, використання даного способу є більш раціональним для застосування під час подвійного очищення молочної сироватки, отриманої з забрудненого молока, від білка та ^{137}Cs . Очищена сироватка може бути використана для виробництва різноманітних напоїв функціонального призначення, а осад буде утилізовано за встановленими правилами до забрудненої сировини.

Враховуючи значний потенціал нанотехнологій у молочній промисловості, важливо більш детально розглянути особливості застосування окремих наноматеріалів у виробництві молочних продуктів. Одним із найперспективніших нанокомпонентів для харчової промисловості є пірогенний кремнезем, який завдяки своїм унікальним фізико-хімічним характеристикам може використовуватися як стабілізатор, антипінний агент та ентеросорбент. Наступний розділ буде присвячено аналізу можливостей його застосування у молочному виробництві.

1.4 Пірогенний кремнезем як перспективний нанокomпонент для харчової промисловості.

Пірогенний кремнезем (pyrogenic silica, fumed silica) є однією з найбільш поширених форм нанодіоксиду кремнію (SiO_2), що використовується в різних галузях промисловості, зокрема і в харчовій. Його унікальні фізико-хімічні властивості, зокрема висока питома поверхня, гідрофільність або гідрофобність (залежно від обробки), а також здатність до адсорбції, роблять його перспективним компонентом для застосування у молочній та загалом харчовій промисловості. Завдяки своїй мікронаноструктурі він може виконувати функції стабілізатора, загущувача, антизлежувального агента, а також сорбенту для очищення продуктів (Handford et al., 2014).

Кремнезем - це природний мінерал, що складається з діоксиду кремнію, який зустрічається в кристалічній або аморфній формі. Кремнезем складає 21 % земної кори і є найпоширенішою з усіх хімічних сполук (Lemen & Bingham, 2001).

У своїй природній формі кремнезем зустрічається у кварці, піску та гірських породах, а в промисловості — у вигляді різних форм, таких як аморфний, колоїдний або синтетичний діоксид кремнію, що відрізняються своїми фізико-хімічними властивостями, методами отримання та застосуванням. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, він знайшов застосування у багатьох галузях, включаючи будівництво, електроніку, хімію, медицину та харчову промисловість. Однією з найбільш цінних форм кремнезему в промисловості є пірогенний кремнезем, який отримують синтетичним шляхом.

В Інституті хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України розроблено технології отримання нанодисперсних порошоків кремнезему та проведено дослідження їхніх фізичних, хімічних, фізико-хімічних і фармакологічних властивостей (Chuyko et al., 2006). Створені препарати застосовуються в

лікуванні отруень, а також у хірургічній і дерматологічній практиці. Доведено їхню ефективну детоксикаційну дію (Chuyko et al., 2003).

На сьогоднішній день провідним виробником пірогенного кремнезему на території України та країн Східної Європи є компанія “Орісіл”. Пірогенний кремнезем, який вона виробляє – це високодисперсний аморфний діоксид кремнію (SiO_2), що виготовляють шляхом полум’яного гідролізу чотирихлористого кремнію (SiCl_4). Процес полум’яного гідролізу здійснюють в газовій фазі плазми повітряно-водневого полум’я при температурі 1100 — 1400°C (Orisil, n.d.).

Пірогенний кремнезем має широкий спектр застосування у промисловості. Наприклад, згідно Ettliger, Ladwig, і Weise (2000) пірогенний діоксид кремнію є важливим компонентом для регулювання реологічних властивостей лакофарбових матеріалів. Його модифікація дозволяє адаптувати матеріал до різних середовищ, покращуючи адгезію, стійкість і якість покриттів.

На сайті української компанії-виробника “Орісіл” (Orisil, n.d.) зазначений спектр застосувань пірогенного кремнезему (ПК), перелік яких зазначений в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Сфери застосування пірогенного кремнезему

Сфера застосування	Опис застосування
Фарби та покриття	Пірогенний кремнезем (ПК) є стабілізатором і антиседиментаційною добавкою, що запобігає осіданню пігментів і покращує тиксотропію та реологічні властивості лакофарбових матеріалів, зберігаючи прозорість лаків. Він сприяє рівномірному диспергуванню пігментів, підвищує міцність

	і адгезію покриттів, уповільнює старіння та вигорання матеріалів. ПК також зменшує стікання фарб на вертикальних поверхнях і використовується для матування лакових покриттів
Чорнила	У промислових чорнилах ПК застосовують як загущувач. У чорнилах для офсетного друку гідрофільний ПК прискорює висихання та знижує ризик змазування, тоді як гідрофобний ПК зменшує водопоглинання, піноутворення і покращує глибину кольору, зберігаючи блиск. У гравіюванні, флексографії та шовкографії ПК регулює в'язкість і запобігає осіданню пігменту. Також його використовують для контролю потоку чорнил у принтерах і копірах
Герметики та клеї	Пірогенний кремнезем забезпечує необхідну механічну міцність герметика після затвердіння. У виробництві клеїв невелика добавка ПК сповільнює седиментацію, підвищує в'язкість, зменшує час застигання, знижує утворення ниток і значно покращує адгезію. Для досягнення високої водовідштовхувальної здатності може використовуватися гідрофобний (модифікований) продукт замість гідрофільного.

ПВХ пластизолі	ПК використовують як наповнювач у ПВХ пластизолях. Додавання навіть невеликих кількостей продукту суттєво підвищує їхню в'язкість. Крім того, присутність ПК значно покращує адгезію пластизолей до металевих поверхонь, що особливо важливо для масових промислових застосувань, таких як нанесення пластизолей методом розпилення.
Акумуляторні кислоти	Сучасні свинцеві акумулятори використовують кислотний електроліт, який за допомогою ПК може бути перетворений у гелеподібний стан. Це суттєво зменшує осипання пластин, а також запобігає витіканню електроліту з акумулятора. ПК є хімічно інертним і не реагує з кислотою, зберігаючи всі властивості електроліту.
Термоізоляція	ПК має відмінні термоізоляційні властивості завдяки мікроскопічним частинкам і стабільності до 1200 °С. Він використовується для ізоляції печей, авіаційних турбін, холодильних установок і резервуарів для зріджених газів. ПК також є основою для VIP-панелей (vacuum insulation panels), які ефективно запобігають тепловим втратам завдяки унікальній мікронізованій структурі.
Порошки та сипучі матеріали	ПК використовується як антизлежувач у виробництві мінеральних добрив,

	<p>запобігаючи агломерації частинок та підвищуючи текучість порошків. Завдяки інертності, він не впливає на хімічні властивості матеріалів. ПК також запобігає пригорянню у ливарних формах, покращує текучість у порошкових вогнегасниках і забезпечує рівномірне наповнення матриць у фармацевтичному пресуванні таблеток. У харчовій промисловості він запобігає злипанню цукрової пудри, солі та спецій. Крім того, ПК регулює сипучість сухих тонерів у картриджах принтерів.</p>
<p>Косметика та засоби персонального догляду</p>	<p>ПК широко застосовується у косметиці та засобах персонального догляду завдяки своїм унікальним властивостям. У кольоровій косметиці він контролює в'язкість і запобігає агломерації пігментів, у порошкових засобах покращує текучість. У лаках для нігтів ПК сприяє рівномірному розподілу пігментів, зменшує седиментацію та регулює реологію. Його також використовують у губних помадах, антиперспірантах, зубних пастах, засобах догляду за волоссям та інших продуктах.</p>
<p>Фармацевтика</p>	<p>ПК забезпечує пастам і мазям потрібну консистенцію та запобігає розшаруванню компонентів. Невеликі добавки ПК</p>

	<p>стабілізують емульсії та лосьйони. Порошкові продукти, такі як антисептичні та косметичні пудри, завдяки ПК стають легкими у розподілі та нанесенні. У фармацевтиці ПК використовують як допоміжну речовину для таблетування та дражирування. Важливо, що абсорбовані на поверхні ПК лікарські препарати поступово вивільняються у водному середовищі організму, забезпечуючи пролонговану дію та підвищуючи ефективність лікарських засобів.</p>
Харчова промисловість	<p>ПК використовується у харчовій промисловості як антизлежувач для сипучих продуктів, сприяючи їх вільній текучості та покращуючи умови зберігання. Він адсорбує рідини, перетворюючи їх на сухі порошки, які легко змішуються з іншими компонентами. За високих концентрацій ПК може маскувати смак, що спрощує створення збагачених харчових продуктів. Також він є ефективним загущувачем, емульгатором і гелеутворювачем, запобігає осадженню та утримує важчі елементи у системі.</p>

У статті (Bai et al., 2006) було досліджено наночастинки діоксиду кремнію (SiO_2), що були використані як носії для ферментів, з метою забезпечення їх рівномірного розподілу у харчових матрицях і підвищення каталітичної активності. Ці наночастинки ефективно гідролізували

оливкову олію та продемонстрували високу стабільність, адаптивність і можливість багаторазового використання.

В українському науковому просторі застосування кремнезему в харчовій промисловості досліджувалося співробітниками Національного університету харчових технологій. Зокрема, Фурсік, Страшинський і Маринін (2019) досліджували використання нанотехнологій у харчовій промисловості щодо використання нанокompозиту діоксиду кремнію аморфного для вивчення зміни основних функціонально-технологічних властивостей білкових препаратів. В результаті досліджень було виявлено, що внесення кремнезему у склад модельних суспензій сприяє покращенню даного показника для всіх дослідних зразків білкових препаратів в середньому на 13 % в порівнянні із зразками без використання даного нанокompозиту. Поряд з цим, при внесенні нанокompозиту спостерігається зменшення показника критичної концентрації гелеутворення в середньому на 20 % порівняно із даними без його внесення. Також зафіксовані дані по зміні емульгуючих характеристик досліджуваних білкових препаратів, які полягали у підвищенні показників емульгуючої здатності і стійкості емульсії в середньому на 4-15 % та 8-25 % відповідно при використанні у складі дослідних зразків емульсії обраного нанокompозиту.

Пасічний і Геречук (2015) проаналізували вплив високодисперсного кремнезему на структурно-механічні властивості м'ясомістких кулінарних напівфабрикатів та встановили що додавання кремнезему сприяє підвищенню ефективної в'язкості, покращенню консистенції виробів та їхньої вологозв'язувальної здатності.

Іванов, Пасічний, Страшинський і Фурсік (2014) досліджували можливість внесення харчової добавки кремнезем (E551) на ФТП білкової системи м'ясної сировини. Результати досліджень з урахуванням раціонального значення вологозв'язуючої здатності (B33) на рівні 85 % (рис.1) свідчать, що додавання кремнезему у кількості 0,3 % збільшує

значення ВЗЗа у середньому на $3,6 \pm 0,1$ %. Це підтверджує гіпотезу про те, що до кремнієвих наночастинок можуть приєднуватись пептиди та білки.

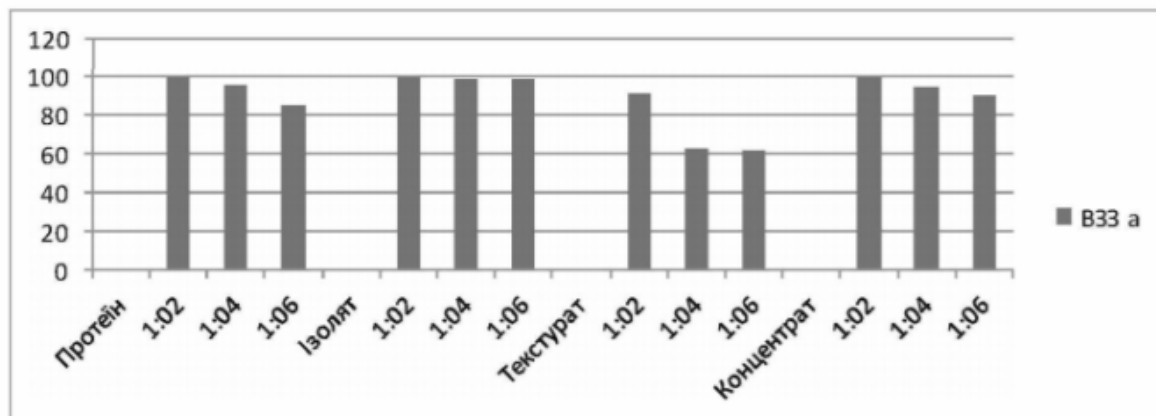


Рисунок 1.1 — Залежність показника ВЗЗ білкових препаратів від ступеня гідратації після внесення кремнезему

У дисертаційній роботі Кочубей-Литвиненко (2021) було використано гідрофільний пірогенний діоксид кремнію ТМ «Асіл» в якості харчової антизлежувальної добавки до сухої демінералізованої молочної сироватки. Додавання діоксиду кремнію у якості антизлежувального агента до сухої молочної сироватки спричинило підвищення температури склування на 10°C , що характеризує підвищення стійкості до зберігання. Присутність діоксиду кремнію у кількості 1 % від загальної маси дещо зменшило ризик злежування частинок продукту, про що засвідчив індекс SCS та ступінь злежування, визначений експериментально.

У Європейському Союзі використання пірогенного кремнезему (E551) у харчовій промисловості регулюється Регламентом (ЄС) № 1333/2008 про харчові добавки. Цей регламент визначає умови використання діоксиду кремнію як антизлежувача в різних харчових продуктах. Крім того, Регламент (ЄС) № 231/2012 встановлює специфікації для харчових добавок, включаючи пірогенний кремнезем, що стосуються його чистоти та фізико-хімічних властивостей. Виробники зобов'язані

дотримуватися цих стандартів, щоб забезпечити безпеку та якість харчових продуктів.

Оскільки правила ЄС передбачають регулярну переоцінку харчових добавок з урахуванням нових наукових даних, EFSA (European Food Safety Authority) переглянула наявну інформацію щодо E 551.

У дослідженні Younes та ін. (2018) проведено переоцінку діоксиду кремнію (E551) як харчової добавки. EFSA підтвердила, що діоксид кремнію є хімічно стабільним, інертним і не накопичується в організмі людини. Дослідження показали, що E 551 не є токсичним, не викликає мутацій або канцерогенних ефектів. Також було розглянуто наночастинки, які можуть входити до складу цієї добавки, і встановлено, що вони не становлять додаткових ризиків для здоров'я. Через низький рівень абсорбції діоксиду кремнію в організмі необхідність встановлення конкретного допустимого рівня споживання (ADI) відсутня.

EFSA рекомендувала продовжити дослідження щодо впливу наночастинок та зберегти дозвіл на використання E551 у харчовій промисловості. Висновки цієї роботи підтверджують безпечність діоксиду кремнію за умов дотримання чинного законодавства та підтримують довіру споживачів до харчових продуктів у Європейському Союзі.

Враховуючи вищезазначену інформацію, можна дійти висновку, що пірогенний кремнезем є перспективним наноматеріалом для використання в молочній промисловості завдяки своїм стабілізаційним, антизлежувальним та сорбційним властивостям. Однак його застосування потребує подальших досліджень щодо біодоступності та впливу на організм людини.

Окрім пірогенного кремнезему, ще одним важливим наноматеріалом у молочному виробництві є оксид цинку. Він має не лише антимікробні властивості, а й здатність впливати на ферментативні процеси у молочних продуктах, що робить його цікавим об'єктом для дослідження. У

наступному підрозділі буде розглянуто перспективи використання наночастинок оксиду цинку у харчовій промисловості та їхню роль у створенні безпечних та функціональних молочних продуктів.

1.5 Нано-оксид цинку як перспективний нанокomпонент для харчової промисловості

Оксид цинку (ZnO) є одним із найбільш вивчених і застосовуваних наноматеріалів у харчовій промисловості завдяки його вираженим антимікробним, каталітичним та стабілізуювальним властивостям. Наночастинки ZnO демонструють широкий спектр біологічної активності, включаючи антибактеріальний, антиоксидантний та ферментативний вплив, що робить їх перспективним інгредієнтом у виробництві харчових продуктів та пакувальних матеріалів (Handford et al., 2014).

Наночастинки ZnO мають сферичну або стрижнеподібну морфологію з розмірами від 10 до 100 нм, що забезпечує їм високу реакційну здатність і здатність взаємодіяти з біомолекулами (Wu et al., 2014).

Основними характеристиками оксиду цинку є:

- Висока хімічна стабільність у нейтральних та слабкокислих середовищах.
- Сильна антимікробна активність, що зумовлена утворенням активних форм кисню (ROS), які пошкоджують клітинні мембрани бактерій.
- Каталітична активність, що дозволяє застосовувати ZnO у ферментативних процесах.
- Добра біодоступність, що робить його перспективним для використання у збагачених харчових продуктах.

Ці властивості обумовлюють широкий спектр використання ZnO в молочній промисловості, особливо для покращення мікробіологічної безпеки та оптимізації ферментаційних процесів.

Оксид цинку (ZnO) є неорганічною сполукою, яка знаходить широке застосування в різних галузях промисловості та медицини. Завдяки своїм

унікальним властивостям, НЧ ZnO широко використовуються у медицині та фармакології, харчовій промисловості, сільському господарстві, виробництві косметики та засобів особистої гігієни (Чекман та ін., 2013; Jiang, 2018).

У статті (Kumar et al., 2015) досліджується вплив наночастинок оксиду цинку на активність нітрогенази у бобових рослин. Враховуючи, що нітрогеназа є ключовим ферментом у процесі біологічної фіксації азоту, розуміння її реакції на вплив наноматеріалів є важливим для аграрної та екологічної науки. Дослідження виявило залежність активності нітрогенази від концентрації НЧ ZnO та часу впливу.

У дослідженні (Дубівко та ін., 2022) продемонстровано позитивний вплив колоїдного розчину цинку, отриманого методом електроіскрового диспергування струмопровідних гранул цинку у водному середовищі, на процес пророщування зерна, що може бути перспективним для подальшого використання у виробництві харчових продуктів.

У роботах (Кочубей-Литвиненко & Лопатько, 2021; Кочубей-Литвиненко та ін., 2023) процес збагачення молочної сироватки для покращення її технологічно-функціональних властивостей та прискорення ферментативних використали металовмісні частинки магнію, мангану та цинку у нано- та ультрарозмірних діапазонах. Ці частинки отримують за тією ж технологією, що й у згаданому вище дослідженні.

Цинк можна розглядати як один з елементів, що сприяє інтенсифікації ферментації, оскільки він бере участь у побудові компонентів живої клітини, сприяє енергетичному обміну та синтезу білків мікробних клітин, активує і стабілізує ферментативну активність (Birch et al., 2003; Stehlik-Tomas et al., 2004), а також покращує бродильну активність пивних дріжджів (Karputina et al., 2012; Koshova et al., 2015). Такий підхід може сприяти пришвидшенню ферментації сироватки молочної для її подальшого застосування у хлібопекарській галузі.

Антимікробні властивості та механізми впливу ZnO забезпечують його високу ефективність проти широкого спектра мікроорганізмів, зокрема таких як *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* та *Salmonella spp.*. Його бактерицидна дія пояснюється кількома ключовими механізмами. По-перше, наночастинки ZnO здатні генерувати активні форми кисню (ROS), які викликають окислювальний стрес у клітинних мембранах бактерій, що зрештою призводить до їхнього руйнування (Sirelkhatim et al., 2015). Цей механізм особливо ефективний у середовищах із високим вмістом вологи, що робить його перспективним для використання в молочних продуктах. По-друге, оксид цинку проявляє іонний ефект, при якому іони Zn^{2+} проникають у бактеріальні клітини та взаємодіють із білками та ДНК, інгібуючи життєво важливі функції мікроорганізмів (Lallo da Silva et al., 2019).

Крім того, ZnO може змінювати проникність клітинних мембран, що спричиняє дисбаланс іонів і руйнування бактеріальної структури. Саме ці особливості дають змогу використовувати його в молочній промисловості для контролю мікробного забруднення, подовження терміну зберігання та забезпечення стабільності продукції (Handford et al., 2014).

Одним із ключових аспектів застосування ZnO є його вплив на ферментаційні процеси в кисломолочних продуктах. Контрольоване додавання наночастинок ZnO у низьких концентраціях сприяє підтримці оптимальної активності молочнокислих бактерій, що забезпечує рівномірне протікання процесів бродіння та формування бажаних сенсорних характеристик (Tamjidi et al., 2013).

Дослідження Biswas et al. (2022) показали, що ZnO може виступати як кофактор ферментативних реакцій, що дозволяє покращити біохімічні перетворення під час виробництва йогуртів, сирів та кефіру. Завдяки своїм властивостям оксид цинку здатний стабілізувати кислотно-основний баланс

у середовищі, запобігаючи надмірному зростанню небажаної мікрофлори та підвищуючи безпечність кінцевого продукту.

Ще одним перспективним напрямом є використання ZnO для стабілізації білкових структур у молочних продуктах. Відомо, що білки молока, особливо казеїнові мішелі, мають схильність до агрегації при зміні фізико-хімічних умов, що може негативно впливати на текстуру й органолептичні властивості кінцевого продукту. Введення наночастинок ZnO у молочні системи сприяє взаємодії між білками та наночастинками, що перешкоджає їхньому злипанню та утворенню осаду (Handford et al., 2014). Це забезпечує стабільність таких продуктів, як молочні напої, ультрапастеризоване молоко та збагачені білкові коктейлі.

Окрім впливу на структуру продуктів, наночастинки ZnO можуть відігравати важливу роль у збагаченні молочних виробів мікроелементами. Оскільки цинк є необхідним для багатьох метаболічних процесів організму, його використання у вигляді наноформ забезпечує значно вищу біодоступність порівняно з традиційними формами цього мікроелемента (Pereira et al., 2014). Дослідження свідчать, що споживання продуктів, збагачених ZnO, може сприяти покращенню імунної функції, регуляції ферментативних процесів і підтримці здорового стану шкіри та волосся. Використання таких добавок особливо актуальне для функціонального харчування, яке орієнтоване на дітей, людей похилого віку та осіб із підвищеними фізичними навантаженнями.

Ще одним важливим напрямом застосування ZnO є його використання у виробництві активних пакувальних матеріалів для молочної продукції. Додавання наночастинок ZnO у полімерні пакувальні матеріали дозволяє створити ефективний антимікробний бар'єр, що значно зменшує ймовірність бактеріального забруднення продукту під час транспортування та зберігання (Saffarionpour, 2019). Завдяки своїй здатності пригнічувати ріст мікроорганізмів, пакування з наночастинками ZnO дозволяє

продовжити термін зберігання молочних продуктів без використання додаткових консервантів. Крім того, такі пакувальні матеріали мають підвищену стійкість до ультрафіолетового випромінювання, що захищає чутливі до світла компоненти молочних виробів від деградації (Doyle, 2006).

Згідно з досліджень (He & Hwang, 2016) та (Nile et al., 2020) наночастинки оксиду цинку демонструють високу біодоступність та потенціал для збагачення продуктів мікроелементами, покращення їхніх функціональних властивостей та продовження терміну зберігання.

Хоча оксид цинку широко використовується в різних галузях, питання його безпечності залишається актуальним. Дослідження Liu та ін. (2016) показали, що наночастинки оксиду цинку можуть виділяти іони цинку, які потенційно здатні викликати токсичні ефекти в організмі. Це підкреслює необхідність ретельного контролю розмірів частинок та концентрацій при розробці продуктів, що містять ZnO, особливо в харчовій та медичній сферах.

Додатково, дослідження Wang та ін. (2008) продемонстрували, що наночастинки оксиду цинку можуть викликати окислювальний стрес та запальні реакції у лабораторних тварин при високих дозах.

У статті Fukui, Horie, Endoh, Kato, Fujita та ін. (2012) було наночастинок оксиду цинку (ZnO) на легені щурів при внутрішньотрахеальному введенні, з акцентом на індукцію окислювального стресу. Автори виявили, що НЧ ZnO вивільняють іони цинку (Zn^{2+}), що сприяє підвищенню рівня активних форм кисню (ROS) в клітинах. Дослідження *in vitro* на клітинах A549 (карцинома легені людини) підтвердило, що ZnO наночастинки спричиняють сильний цитотоксичний ефект, пов'язаний із накопиченням Zn^{2+} та підвищеним рівнем ROS, що призводить до загибелі клітин. Крім того, експерименти показали, що

введення розчину $ZnCl_2$ мало слабший ефект, що свідчить про те, що саме наночастинки ZnO є джерелом пролонгованого окисного стресу.

У науковому висновку Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA, 2016) розглянуто питання безпеки використання наночастинок оксиду цинку (ZnO) в матеріалах, що контактують із харчовими продуктами. Оцінка проводилась відповідно до положень Регламенту (ЄС) No 1935/2004, що регулює використання матеріалів, які можуть вступати в контакт з харчовими продуктами. Висновок підтвердив, що наночастинки ZnO можуть безпечно використовуватися в полімерних упаковках, але міграція Zn^{2+} може бути обмежувальним фактором через можливе перевищення допустимого добового рівня споживання.

З огляду на всі вищезазначені аспекти, можна зробити висновок, що наночастинки оксиду цинку демонструють значний потенціал для застосування у молочній промисловості завдяки своїм антимікробним, стабілізуючим і мінералізувальним властивостям. Вони сприяють підвищенню безпеки продуктів, покращенню їхньої текстури та збільшенню терміну зберігання, а також можуть бути використані у виробництві функціональних молочних виробів. Проте для забезпечення безпечного використання ZnO необхідно проводити подальші дослідження щодо його довгострокового впливу на організм людини та визначити оптимальні допустимі рівні застосування.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ I

Нанотехнології відкривають широкі можливості для вдосконалення харчової промисловості, забезпечуючи підвищення якості, безпеки та ефективності виробництва. На основі проведеного літературного аналізу можна зробити висновок, що застосування наночастинок дозволяє значно покращити текстурні, функціональні та сенсорні характеристики харчових

продуктів, подовжити термін їх зберігання та оптимізувати біодоступність поживних речовин.

Виявлено, що наноматеріали, завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, демонструють широкий спектр корисних ефектів, включаючи антимікробну дію, здатність адсорбувати небажані компоненти та можливість контрольованого вивільнення біологічно активних речовин.

Згідно проаналізованих досліджень, можна відслідкувати ефективність наночастинок у різних аспектах харчової промисловості, зокрема у створенні наносенсорів для моніторингу якості, покращенні стабільності та консистенції харчових систем, розробці інтелектуальних пакувальних матеріалів та очищенні сировини від шкідливих домішок.

Окрему увагу приділено аналізу використання наночастинок у молочній промисловості, де їх застосування має потенціал вирішення таких проблем, як утилізація сироваткових відходів, зниження рівня радіонуклідів у молочній продукції та стабільність сухих молочних продуктів.

Основний фокус серед наночастинок було зосереджено на пірогенному кремнеземі та оксиду цинку враховуючи їх широкий спектр застосування та доступність в межах вітчизняного виробництва.

Пірогенний кремнезем є однією з найперспективніших форм діоксиду кремнію, що широко використовується у харчовій промисловості завдяки своїм сорбційним, стабілізуювальним та антизлежувальним властивостям. Попередні літературні дослідження показують, що додавання кремнезему до сухих харчових продуктів, зокрема сухої молочної сироватки, сприяє покращенню їхньої сипучості, зменшує ризик комкування та підвищує термостійкість.

Завдяки високій питомій поверхні кремнезем може ефективно зв'язувати небажані домішки, що робить його перспективним адсорбентом для очищення білка у сироватці молочній. Водночас нормативне регулювання вимагає постійного контролю над допустимими дозами

пірогенного кремнезему, оскільки його нанорозмірні частинки можуть потенційно накопичуватися в організмі.

Оксид цинку (ZnO) також займає важливе місце серед наноматеріалів для перспективи застосування у харчовій промисловості, завдяки його вираженим антимікробним властивостям, високій біодоступності та ролі у збагаченні продуктів цинком. Дослідження показали, що НЧ ZnO мають здатність до пригнічення росту патогенних мікроорганізмів, що робить його перспективним компонентом антимікробних пакувальних матеріалів та консервантів. Крім того, його використання у складі харчових добавок може коригувати дефіцит цинку в організмі людини, що є важливим для підтримки нормального функціонування імунної системи. Проте окремі наукові роботи вказують на можливість окислювального стресу та цитотоксичності при накопиченні іонів цинку в клітинах, що потребує подальших досліджень для визначення безпечних концентрацій та умов застосування ZnO у харчових продуктах.

Особливу увагу приділено питанням безпечності використання наночастинок у харчовій промисловості. Регуляторні органи, такі як EFSA, постійно оновлюють стандарти оцінки ризиків, пов'язаних із впливом наноматеріалів на організм людини. Проведені дослідження підтверджують, що наночастинок кремнезему (E551) та ZnO є безпечними за умов дотримання нормативних вимог, однак питання довгострокового впливу наночастинок залишається відкритим. Окремі дослідження вказують на можливість окислювального стресу при накопиченні наночастинок оксидів металів в організмі, що вимагає подальшого наукового моніторингу та вдосконалення систем контролю якості наноматеріалів у харчових продуктах.

РОЗДІЛ II. ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ. ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИ

2.1 Алгоритм проведення досліджень

Експериментальна частина дисертаційної роботи була виконана на базі низки наукових, освітніх та виробничих установ, зокрема:

- Лабораторії кафедр технології молока і молочних продуктів, технології хлібопекарських і кондитерських виробів, а також проблемної науково-дослідної лабораторії НУХТ;
- Кафедра технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства НУБіП України;
- Інститут біохімії імені О. В. Палладіна НАН України
- Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України;
- Науково-дослідна лабораторія ТОВ "Nanomedtech";
- Лабораторія ДП "Державний центр сертифікації і експертизи сільськогосподарської продукції";
- Державна установа "Центр громадського здоров'я Міністерства охорони здоров'я України";
- Виробнича лабораторія ТОВ "Галіївський маслозавод".

Результати досліджень було впроваджено у навчальний процес підготовки здобувачів вищої освіти на кафедрі технології молока і молочних продуктів НУХТ.

На основі проведеного аналізу літературних джерел було розроблену схему проведення досліджень, сформульовано мету та завдання, обрані об'єкти та предмет досліджень. Розроблена схема представлена на рисунку 2.1.

На експериментальному етапі обґрунтовано вибір пірогенного кремнезему (SiO_2) та наночастинок оксиду цинку (ZnO) як функціональних

наноматеріалів для дослідження. Вивчено їх вплив на рідку та суху молочну сироватку в контексті різних технологічних задач. Проведено підбір оптимального співвідношення маси пірогенного кремнезему до об'єму рідкої сироватки молочної для максимального ступеня адсорбції білків, а також досліджено ефективність додавання SiO_2 як антизлежувального агента до сухої молочної сироватки.

Наночастинки ZnO , синтезовані методом електроіскрового диспергування цинку безпосередньо в середовищі сироватки, застосовувались для вивчення їх здатності до стимулювання ферментаційних процесів і впливу на цитотоксичність щодо білків плазми крові.

Розроблено технологічну та апаратурно-технологічну схеми застосування пірогенного кремнезему для освітлення сироватки молочної, одержаної в процесі виробництва м'якого сиру термокислотним способом. На завершальному етапі роботи обґрунтовано соціальну значущість отриманих результатів з огляду на актуальні екологічні вимоги, ресурсоефективність технологій та виклики, пов'язані з інтеграцією України до Європейського Союзу.



Рисунок 2.1 — Схема проведення досліджень

2.2 Сировина та матеріали

Сировина, наноматеріали, що використовувалися для проведення досліджень, відповідали вимогам нормативних документів, а саме:

- Сироватка молочна, одержана після виробництва сичужних сирів (сироватка молочна підсирна) та сироватка молочна з-під сиру кисломолочного відповідно до ДСТУ 7515:2014 Сироватка молочна. Технічні умови
- Сироватка молочна демінералізована суха (ТУ10.5-34480442-010:2013, ТОВ “Галіївський маслозавод”)
- Сироватка молочна пастеризована (ТУ 46.39 України 11-93, ПрАТ “Обухівський молокозавод”)
- Молоко знежирене для виготовлення сиру м’якого, відповідно до ДСТУ 3662:2018 Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови.
- Гідрофільний та гідрофобний пірогенний кремнезем (ТУ 24.1-05540209-003:2010., (E-551) Silicon dioxide amorphous ТМ «Орісіл» з питомою поверхнею 150 ± 25 м²/г, 170 ± 30 м²/г, 200 ± 25 м²/г, 300 ± 30 м²/г, 380 ± 40 м²/г)
- Колоїдний розчин цинку, отриманий електроіскровим диспергуванням струмопровідних гранул цинку в середовищі дейонізованої води (лабораторна установка та параметри отримання описані у підрозд. 2.3.1.)
- Сіль ZnSO₄ від ТОВ “ЛОГІКЛАБГРУПА”, згідно з Регламентом ЄС № 1925/2006
- ГСТУ 46.004-99 Борошно пшеничне. Технічні умови
- ДСТУ 8791:2018 Борошно житнє хлібопекарське. Технічні умови
- Вода питна – згідно Сан Пін 2.2.4–171–10 та ДСТУ 7525:2014
- Дріжджі пресовані хлібопекарські згідно ДСТУ 4812:2007
- Сіль кухонна відповідно до ДСТУ 3583:2015

2.3 Методи дослідження

У ході виконання роботи було застосовано стандартні, загальноприйняті, удосконалені та спеціалізовані фізичні, хімічні, фізико-хімічні й органолептичні методи, реалізовані за використання сучасного обладнання та комп'ютерних технологій. Додатково було застосовано методи математичного моделювання та статистичної обробки експериментальних даних.

2.3.1 Методи якісного та кількісного аналізу

Визначення розподілу розмірів частинок та ζ -потенціалу

Розміри частинок та електрокінетичний потенціал (ζ -потенціал) у зразках молочної сироватки обробленої наночастинками SiO₂ та ZnO визначали методом динамічного світлорозсіювання з використанням аналізатора Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Велика Британія).

Дослідження проводили при температурі 20–25 °С з використанням гелій-неонового лазера потужністю 4 мВт та довжиною хвилі 633 нм. Кут реєстрації сигналу становив 173°. Для вимірювання застосовували одноразові полістирольні кювети (тип DTS 0012), які заповнювали 1 мл дослідного зразка.

Результати розраховували автоматично за допомогою програмного забезпечення Zetasizer Software v7.13 на основі моделі континуального розподілу.

Визначення електропровідності сироватки молочної

Електропровідність зразків молочної сироватки до і після електроіскрового диспергування визначали методом імпедансної спектроскопії з використанням Malvern Zetasizer Nano ZS, оснащеного функцією вимірювання електропровідності у режимі DTS1070. Перед вимірюванням зразки термостатували до температури 25 ± 0,5 °С. Дані

записували у мСм/см. Для кожного зразка проводили три незалежні вимірювання.

Визначення масової частки вологи та сухих речовин

Визначення масової частки вологи та сухих речовин визначали згідно ДСТУ 8552:2015

Визначення ступеня злежування сухої молочної сироватки

Ступінь злежування сухої молочної сироватки (СЗ) оцінювали за методикою, розробленою корпорацією GEA Niro (протоколи A14a та A15a) згідно з рекомендаціями Westergaard (2010). Зразки порошку витримували в камері з відносною вологістю понад 79,5 % до моменту стабілізації їхньої маси.

Після цього зразки висушували до постійної маси та піддавали фракційному просіюванню через металеві сита з діаметром отворів 250 мкм і 500 мкм. Ступінь злежування розраховували як відсоток маси фракції, що не пройшла крізь сито з відповідним розміром комірок, від загальної маси зразка.

Визначення титрованої кислотності сироватки молочної

Титровану кислотність сироватки молочної визначали відповідно до ДСТУ ISO 6091:2007 (ISO 6091:1980) – «Молоко сухе. Визначення титрованої кислотності».

Визначення активної кислотності молочної сироватки

Визначення активної кислотності проводили потенціометричним методом відповідно до ДСТУ 8550:2015 з використанням лабораторного рН-метра ADWA AD1200 ATC.

Визначення показника активності води

Показник активності води (A_w) досліджували на приладі Hygrolab-2 (Rotronic, Швейцарія) з точністю $\pm 0,001$ одиниці A_w . Активність води виражена у значеннях від 0,00 до 1,00 A_w (0...100 % rh). Перед вимірюванням активності води прилад проходив калібрування за

спеціальним стандартом вологості (95 % HR). Вимірювання проводили за температури 25 °С.

Визначення загального вмісту білка

Визначення вмісту загального білка виконували за методом К'ельдаля згідно з ДСТУ ISO 8968-1:2005 (IDF 20-1:2001) та за методом Стошека (Stoscheck, 1990) за допомогою спектрофотометра СФ-2000-02 (ОКБ Спектр, Україна) у кюветах з довжиною пробігу променю 1 см при довжинах хвиль 280 нм та 320 нм.

Об'ємна насипна густина, насипна густина після ущільнення пірогенного кремнезему.

Об'ємну насипну густина (loose bulk density) та насипну густина після ущільнення (tamped bulk density) пірогенного кремнезему визначали згідно з вимогами ISO 787-11:1981 «General methods of test for pigments and extenders — Part 11: Determination of tamped volume and apparent density after tamping».

Електрофоретичний аналіз білків

Електрофоретичне дослідження білкового складу проводили методом денатуруючого електрофорезу в поліакриламідному гелі (SDS-PAGE) відповідно до методу Laemmli (1970).

Аналіз виконували на 4–17 % ПААГ у присутності денатуруючого агенту – лаурилсульфату натрію (ДСН/SDS) та відновника – 2-меркаптоетанолу (β -МЕ), що розриває дисульфідні зв'язки білків.

Після завершення електрофорезу гель забарвлювали розчином Coomassie Brilliant Blue R-250 та проводили денситометричний аналіз отриманих смуг

Визначення окисно-відновного потенціалу (ORP)

Визначення окисно-відновного потенціалу проводили потенціометричним методом з використанням комбінованого платинового електрода в парі з еталонним електродом. Вимірювання здійснювали за

допомогою цифрового потенціометра, що дозволяв реєструвати значення у мілівольтах (мВ) з автоматичною температурною компенсацією.

Перед аналізом зразки молочної сироватки термостатували до температури 20 ± 2 °С. Електрод занурювали безпосередньо в рідку фазу зразка, після чого очікували стабілізації сигналу (в межах 30–60 секунд) і фіксували показник ОВП. Вимірювання проводили у трикратній повторюваності для забезпечення достовірності результатів.

Результати реєстрували у мВ відносно стандартного водневого електрода (SHE), з урахуванням корекції потенціалу еталонного електрода. Отримані значення використовували для оцінки загального редокс-стану зразків та виявлення змін у результаті внесення наноматеріалів, ферментації або обробки.

Скануюча електронна мікроскопія (SEM) та енергодисперсійний рентгенівський аналіз (EDX)

Морфологічні та структурні характеристики наночастинок оксиду цинку досліджували методом скануючої електронної мікроскопії з використанням аналітичного електронного мікроскопа високої роздільної здатності JEOL JSM-6490LV. Для підготовки до аналізу зразки фіксували на провідній вугільній підкладці та покривали тонким металевим шаром золота товщиною 3–5 нм у вакуумному напилювальному пристрої.

Спостереження проводили у режимі вторинного електронного випромінювання (SEI) при напрузі прискорення 10–20 кВ. Аналіз мікрображень здійснювали за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для оцінки розміру частинок, форми та ступеня агрегації.

Для визначення елементного складу використовували енергодисперсійний рентгенівський аналіз (EDX), що давав змогу ідентифікувати характерні спектри випромінювання.

Визначення питомої активності ^{137}Cs

Для аналізу питомої активності ^{137}Cs використовували спектрометричний комплекс «ГАММА-ПЛЮС U», який дозволяє визначати активність гамма-випромінювачів методом прямої спектрометрії. Оцінку ефективності сорбції ^{137}Cs здійснювали шляхом порівняння питомої активності до та після обробки.

Оцінка інтенсивності неферментативного потемніння

Ознаки неферментативного потемніння у зразках сухої молочної сироватки визначали шляхом аналізу зміни їх оптичних властивостей протягом зберігання. Параметр білості використовували як індикатор прогресування реакцій Майяра, які можуть відбуватись унаслідок взаємодії залишкової лактози з білками при тривалому зберіганні.

Оцінювання білості здійснювали за допомогою приладу Блік-РЗ, що забезпечує вимірювання зонального коефіцієнта спрямованого відбиття у діапазоні довжин хвиль видимого спектра. Для вимірювання використовували ущільнену та згладжену поверхню порошкоподібного зразка. Порівняння проводили відносно еталонного зразка білого кольору.

Значення білості реєстрували в умовних одиницях, що дозволяло кількісно оцінити динаміку потемніння продукту під час зберігання. Спостереження проводили на 1, 3, 6, 12 і 18 місяці зберігання за стандартних умов.

Визначення концентрації Zn та Si методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП)

Кількісний вміст Zn та Si у зразках визначали за допомогою оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES), використовуючи спектрометр Optima 2100 DV (PerkinElmer, США). Метод ґрунтується на реєстрації характеристичного спектру випромінювання досліджуваних атомів, збуджених у високотемпературній плазмі.

Вимірювання проводили відповідно до інструкцій виробника в режимі аксіального спостереження, що забезпечує підвищену чутливість.

Для контролю точності кожне вимірювання проводили у двох повтореннях. Результат вважали достовірним за умови, що відносне стандартне відхилення не перевищувало 2 %.

Отримані дані використовували для оцінки концентрації Zn та Si у дослідних зразках.

Визначення кількості колонієутворюючих одиниць молочнокислих бактерій (КУО)

Кількість життєздатних молочнокислих бактерій визначали методом посіву на селективне живильне середовище з наступною інкубацією при температурі 25 °C згідно з вимогами стандарту ISO 6611:2004. Після інкубації проводили підрахунок сформованих колоній, результати виражали у колонієутворюючих одиницях (КУО) на 1×10^{-6} м³ досліджуваного зразка.

Визначення фізико-хімічних та реологічних показників якості хліба

Оцінювання якості хлібобулочних виробів проводили відповідно до методичних рекомендацій, викладених у навчальному посібнику «Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництва» (Дробот та ін., 2006).

Визначали такі показники, як вологість, кислотність, пористість, об'єм, а також консистенцію та еластичність м'якуша. Фізико-хімічні властивості встановлювали шляхом стандартного лабораторного аналізу, реологічні — за допомогою органолептичної оцінки і спеціалізованих приладів для вимірювання сили опору стисненню та деформації м'якуша.

Оцінювання впливу наночастинок оксиду цинку на структурну стабільність білків плазми крові

Дослідження змін у структурі білків крові під впливом наночастинок оксиду цинку (ZnO) проводили в умовах *in vitro* за критерієм денатурації. У якості модельних білків застосовували сироватковий альбумін і імуноглобулін людини (виробництва ТОВ «Біофарма», м. Київ).

Розчини білків готували у 0,9 % розчині натрію хлориду з кінцевою концентрацією 1 мг/см³. Для оцінки впливу наночастинок проводили інкубацію розчину білка з розчинами ZnO або ZnSO₄ у співвідношенні 1:1 при температурі 37 °C протягом 2 годин.

Оцінювання функціональної активності перитонеальних макрофагів за допомогою НСТ-тесту

Для оцінки імунологічної реактивності макрофагів під впливом наночастинок цинку використовували модель перитонеальних макрофагів щурів. Після попередньої анестезії тваринам внутрішньочеревно вводили 5 см³ середовища 199 з метою промивання черевної порожнини.

Отриману клітинну суспензію двічі відмивали тим самим середовищем, після чого підраховували кількість життєздатних клітин із використанням вітального барвника трипанового синього у камері Горяєва. До експерименту допускали суспензії з життєздатністю не менше 95%. Суспензії макрофагів у концентрації 5×10^6 клітин/см³ розподіляли по 100 мкл у лунки 96-лункового планшета. У дослідні лунки вносили наночастинок ZnO або розчин ZnSO₄ у концентраціях 1,13; 0,56; 0,28; 0,14 та 0,07 мг/см³ за елементом цинку.

Інкубацію здійснювали протягом 1 години при температурі 37 °C у CO₂-інкубаторі.

Реактивність клітин визначали за здатністю продукувати активні форми кисню – так званий «респіраторний вибух» – за допомогою НСТ-тесту. Після завершення інкубації клітинну суспензію переносили на предметне скло, фіксували метанолом і фарбували 0,2 % розчином нейтрального червоного. За допомогою світлового мікроскопа визначали відсоток НСТ-позитивних клітин – тобто макрофагів, що містили темно-сині гранули формазану як маркер активного кисневого метаболізму.

Отримання колоїдного розчину оксиду цинку методом електроіскрового диспергування

Для підготовки зразків наночастинок оксиду цинку (ZnO) застосовували метод електроіскрового диспергування у рідинному середовищі. Гранули технічно чистого цинку піддавали диспергуванню в об'ємі деіонізованої води з електропровідністю 0,001–0,003 мСм/см. Процес здійснювали у спеціалізованій лабораторній розрядній установці (рис.2.2), основним елементом якої був генератор імпульсів з регульованою частотою від 0,2 до 2,0 кГц та індуктивністю розрядного контуру 1 мкГн.

Гранули металу розміщували на дні діелектричної камери об'ємом до 1000 см³ між електродами, виготовленими з відповідного матеріалу. Накопичення енергії здійснювалося за допомогою конденсаторного блока, що забезпечував стабільну напругу для розрядження. Імпульсні електричні розряди між електродами ініціювали інтенсивну локальну ерозію металу з формуванням нанодисперсних частинок ZnO без необхідності додаткових хімічних реагентів. Отриманий розчин містив стабільну суспензію наночастинок і використовувався для подальших досліджень (у т. ч. з цитотоксичності та ферментаційної активності).

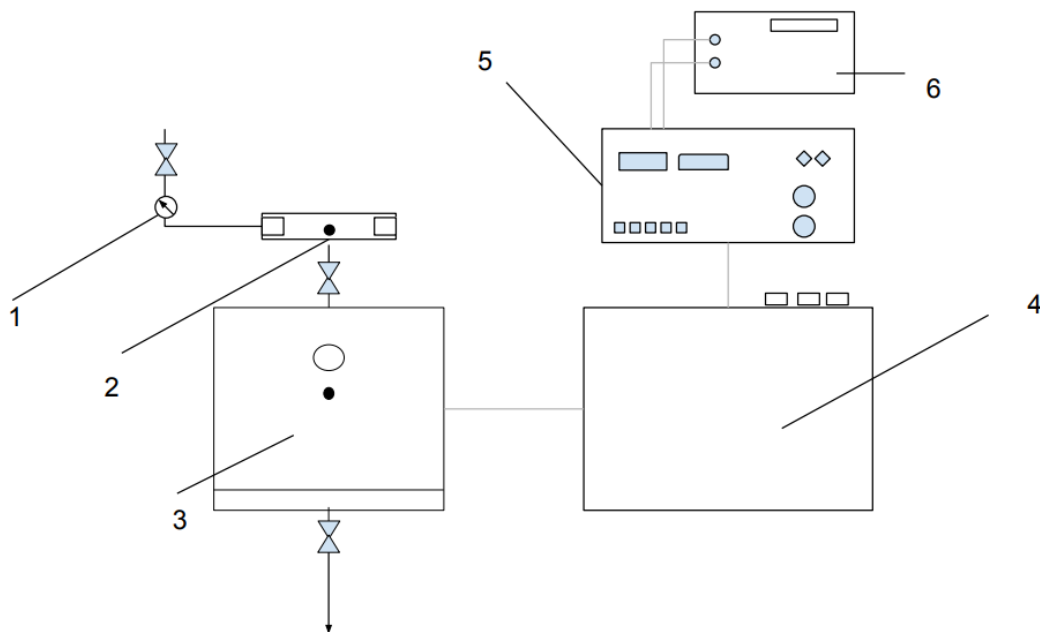


Рисунок 2.2 - Схематичне зображення лабораторної установки для електроіскрового синтезу наночастинок Zn

1 – манометр; 2 – резервуар для деіонізованої води або молочної сироватки; 3 – реакційна розрядна камера зі струмопровідним шаром гранул цинку; 4 – генератор імпульсів електророзряду; 5 – пульт керування; 6 – контрольно-вимірювальний прилад.

Ультразвукове оброблення сироватки молочної

Для здійснення ультразвукового оброблення зразків використовували ультразвуковий гомогенізатор BANDELIN SONOPULS HD 2070 homogeniser (рис.2.3).

Обробку проводили при ультразвуковій частоті $20 \text{ кГц} \pm 500 \text{ Гц}$ та інтенсивності дії в межах 7–10 одиниць за відносною шкалою потужності пристрою. Тривалість експозиції становила від 1 до 5 хвилин.



Рисунок 2.3 - Ультразвуковий гомогенізатор BANDELIN SONOPULS HD 2070 homogeniser

2.3.2 Методи математично-статистичного аналізу

Для обробки результатів експериментальних досліджень застосовували стандартні програмні засоби статистичного аналізу, зокрема Microsoft Excel та Statistica 6.0 (StafSoft). Побудову графіків та візуалізацію результатів здійснювали за допомогою Microsoft Excel 2016. Достовірність результатів забезпечували шляхом три- або п'ятиразового повторення дослідів з подальшим розрахунком середніх значень та відповідних статистичних відхилень.

Апаратурно-технологічні схеми виробничих процесів було розроблено із використанням комп'ютерного програмного забезпечення для автоматизованого проєктування – AutoCAD версії 2018.1.2.

Математичну обробку експериментальних даних проводили із застосуванням дисперсійного аналізу, використовуючи t-критерій Стьюдента та побудову математичних моделей згідно з методологією поверхні відгуку. Обчислення виконували за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel та математичного пакета MathCad.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ II

У розділі 2 представлено деталізований опис етапів виконання науково-дослідної роботи, що стали підґрунтям для побудови схеми реалізації дослідницького процесу.

Висвітлено перелік обраних матеріалів та сировини, що використовувалися в експерименті, описано алгоритм підготовки зразків до дослідження, а також наведено технічні характеристики обладнання, задіяного у виконанні наукового завдання.

Окрему увагу приділено обґрунтуванню вибору методів, які забезпечують достовірність і репрезентативність експериментальних даних, зокрема засобів математико-статистичного аналізу отриманих результатів.

РОЗДІЛ III. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ПІРОГЕННОГО КРЕМНЕЗЕМУ В ТЕХНОЛОГІЇ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ

3.1 Дослідження функціонально-технологічних властивостей пірогенного кремнезему та встановлення параметрів потенційного впливу на адсорбцію білків сироватки молочної

Метою даного підрозділу є дослідження існуючих видів пірогенного кремнезему та окреслення параметрів, що можуть так чи інакше впливати на якість адсорбції білків із сироватки молочної.

Як вже було зазначено у попередніх розділах, пірогенний кремнезем може бути перспективним наноматеріалом для повної або селективної адсорбції білків за рахунок своєї високої питомої поверхні, пористої структури та можливості модифікації поверхні для керування гідрофільно-гідрофобними властивостями. Його застосування у сфері молочної промисловості обумовлене здатністю зв'язувати білки за рахунок іонних, гідрофобних та водневих взаємодій (рис.3.1), що підтверджено дослідженнями Catalano et al. (2015) та Batista et al. (2019).



Рисунок 3.1 – Типи взаємодії SiO₂ з сироватковими білками.

Пірогенний кремнезем (SiO_2) отримують шляхом гідролізу парів SiCl_4 у полум'ї кисню та водню, що призводить до утворення сферичних наночастинок з високою питомою поверхнею (150-400 m^2/g) (Morel et al., 2009), та залежно від хімічної обробки, його можна поділити на гідрофільний та гідрофобний типи (Donnet et al., 2008).

Гідрофільний пірогенний кремнезем характеризується високою спорідненістю до води завдяки наявності значної кількості силанольних груп (-ОН) на його поверхні. Це забезпечує його здатність зв'язувати полярні молекули, включаючи білки, вуглеводи та інші гідрофільні сполуки, що робить його потенційно ефективним адсорбентом у молочній промисловості. Дослідження Batista et al. (2019) показали, що гідрофільні наночастинок кремнезему ефективно зв'язують білки, що пояснюється їх високою питомою поверхнею та розвиненою пористістю. Завдяки цьому гідрофільний кремнезем також використовується в харчових добавках як стабілізатор, що допомагає рівномірно розподіляти інгредієнти та зменшувати небажане випадіння осаду в рідких харчових системах.

Гідрофобний пірогенний кремнезем, на відміну від гідрофільного, має змінену поверхню, на якій силанольні групи заміщені гідрофобними органічними фрагментами, такими як метильні (- CH_3) або силоксанові (Si-O-Si) групи. Це призводить до значного зменшення його змочуваності водою та підвищеної взаємодії з жировими компонентами. Завдяки цьому гідрофобний кремнезем широко застосовується у виробництві жиророзчинних харчових продуктів, включаючи олії, емульсії та порошкові жировмісні продукти. Його використання дозволяє покращувати текстурні характеристики продуктів, запобігаючи їх злипанню або агломерації під час зберігання. Крім того, дослідження Catalano et al. (2015) підтверджують, що гідрофобні частинки кремнезему можуть впливати на стабільність білкових плівок у харчових емульсіях, що відкриває нові можливості для розробки інноваційних структурованих харчових систем.

Виходячи з отриманої інформації, ми можемо сказати, що першим важливим аспектом, який впливає на адсорбційну здатність білків молочної сироватки пірогенним кремнеземом є взаємодія між білковими молекулами та функціональними групами на поверхні матеріалу, що зумовлено його гідрофільністю або гідрофобністю. Дослідження Christenson & Claesson (2001) показали, що наявність гідрофобних або гідрофільних поверхонь безпосередньо впливає на стабільність білкових структур та їхню взаємодію із субстратом.

Другим важливим аспектом впливу на адсорбційні характеристики ПК є питома поверхня. Дослідження Batista et al. (2019) підтверджує, що розмір пор та питома площа поверхні відіграють важливу роль у процесі адсорбції. У випадку адсорбції білків сироватки, такі фактори, як заряд поверхні, пористість та хімічна модифікація, можуть сприяти специфічному або неспецифічному зв'язуванню з поверхнею кремнезему (Gao et al., 2022).

Наступним аспектом потенційного впливу на якість адсорбції є температурний режим та тривалість нагрівання. Підвищена температура може змінювати просторову структуру білкових молекул, підвищуючи їхню гнучкість та сприяючи більш якісній взаємодії з поверхнею пірогенного кремнезему. Крім того, температура впливає на швидкість дифузії молекул, що може як пришвидшувати, так і сповільнювати процес адсорбції. Наприклад, Грегірчак та Антонюк (2011) зазначають, що збільшення температури чинить подвійний вплив на процес адсорбційної іммобілізації. З одного боку інтенсивне нагрівання може спричинити втрату ферментативної активності через теплову денатурацію білкової структури, але в той же час підвищення температури сприяє прискоренню процесу завдяки зростанню швидкості дифузії молекул ферменту у пористій структурі носія. Оптимальна температура визначається характеристиками як самого адсорбованого ферменту, так і поверхні носія.

Кількість внесеного пірогенного кремнезему є ще одним важливим фактором, що впливає на якість адсорбції білків. Зі збільшенням його концентрації зростає доступність активних центрів на поверхні, що може покращувати ефективність зв'язування білків. Водночас надмірна кількість кремнезему може призводити до агрегації частинок, зменшення їхньої активної поверхні та навіть до зниження ефективності адсорбції. Таким чином, оптимальне дозування пірогенного кремнезему є важливим для досягнення максимальної ефективності процесу. Так, у роботі (Sarvi et al., 2014) досліджено використання функціоналізованого мезопористого кремнезему для сорбції білків, що показало, що збільшення кількості сорбенту сприяє більш ефективному видаленню білків із розчину. А в іншому дослідженні (Catalano et al., 2015) встановлено, що взаємодія білків з наночастинками кремнезему залежить від їхньої поверхневої функціоналізації та концентрації.

Наступним важливим для покращення адсорбційних властивостей ПК фактором може бути оптимізація рН середовища, оскільки білки демонструють найбільшу адсорбційну здатність поблизу своєї ізоелектричної точки. Як зазначають Schmitt et al. (2014), білки мають мінімальний електричний заряд при ізоелектричному значенні рН (~4,6–4,7), що сприяє їх більш ефективному зв'язуванню з поверхнею неорганічних сорбентів. Відповідно, контроль рН середовища може бути дуже важливим для підвищення ефективності процесу.

Крім вищезазначених факторів щодо адсорбції білків наночастинками пірогенного кремнезему у чистому вигляді, важливо відзначити перспективність створення нанокомпозитів на основі ПК з іншими наночастинками.

Також можна припустити, що внесення додаткових електролітів, таких як NaCl, сприятиме стабілізації суспензії та запобігатиме утворенню великих агрегатів частинок кремнезему. Це, у свою чергу, може покращити

селективність зв'язування білків і підвищити загальну ефективність процесу. Liu & Tang (2016) довели, що додавання незначних концентрацій солей сприяє зниженню агрегації наночастинок і підвищує їх рівномірний розподіл у водному середовищі, що є критичним для адсорбції білків.

Перспективний підхід додавання до ПК наночастинок оксиду цинку (ZnO) може стати додатковим фактором, який впливає на ефективність цього процесу. Дослідження Anna Solà Rabada (2016) показують, що комбінація ZnO та SiO₂ створює сприятливі умови для селективної сорбції білків, оскільки кожен з цих матеріалів має специфічний механізм зв'язування. Зокрема, ZnO взаємодіє з білками через іони Zn²⁺, формуючи координаційні зв'язки, тоді як пірогенний кремнезем забезпечує велику питому поверхню для адсорбції та стабілізує білкові молекули за рахунок гідрофільних взаємодій.

Крім того, у роботі Solà Rabada (2016) встановлено, що ZnO здатний модифікувати морфологію кремнезему під час сорбційного процесу, що може змінювати ефективність зв'язування білків. ZnO може утворювати специфічні наноструктури, такі як пластинчасті або сферичні наночастинок, які збільшують контактну площу між сорбентом і білками. Це, у свою чергу, може сприяти рівномірному розподілу адсорбованих молекул та підвищенню їхньої стабільності в системі. Враховуючи ці фактори, поєднання ZnO та SiO₂ може розглядатися як перспективний підхід для оптимізації процесів очищення та концентрування білкових розчинів, що може мати широке застосування у біотехнологіях та харчовій промисловості.

Проведений аналіз засвідчив, що окрім виду пірогенного кремнезему, ефективність адсорбції білків із сироватки молочної може залежати від різних фізико-хімічних та технологічних параметрів, а саме:

- Фізико-хімічні властивості кремнезему: питома поверхня, пористість, заряд поверхні.

- Взаємодія білкових молекул із кремнеземом: селективність адсорбції залежно від структури та заряду білків.
- Технологічні параметри адсорбції: температура, тривалість перемішування, концентрація сорбенту, рН середовища.

Створення нанокомпозитів на основі пірогенного кремнезему: додавання наночастинок оксиду цинку (ZnO) до системи пірогенного кремнезему може змінювати характеристики адсорбції завдяки комбінованому впливу цих матеріалів. ZnO, завдяки своїм координаційним властивостям, здатний взаємодіяти з білками через іони Zn^{2+} , тоді як кремнезем забезпечує високу площу адсорбції та стабілізацію білкових молекул.

Отримані висновки потребують подальшого опрацювання та дослідження у наступних підрозділах.

3.1.1 Вивчення впливу виду пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білка в сироватці молочній

Даний підрозділ має на меті дослідити вплив виду пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції сироваткових протеїнів, а саме : гідрофобного та гідрофільного кремнезему. На основі результатів досліджень будуть проведені функціонально-технологічні показники обраного виду пірогенного кремнезему. Це дозволить нам звузити фокус подальших досліджень та зрозуміти морфологію пірогенного кремнезему.

Як вже було зазначено у попередньому підрозділі, важливим фактором, що визначає вибір між гідрофільним та гідрофобним кремнеземом, є їхня взаємодія з білковими молекулами у харчових продуктах. Як зазначають Morel et al. (2009), гідрофільні наночастинки мають вищу спорідненість до білків, зокрема до сироваткових протеїнів, через можливість формування водневих зв'язків та електростатичних взаємодій. Це дозволяє їх використовувати для вибіркового видалення певних білків із харчових систем, що може бути корисним у виробництві

високобілкових продуктів або зниженні алергенного потенціалу харчових інгредієнтів. Натомість гідрофобні наночастинки кремнезему більш ефективні при взаємодії з білками у жирових фазах харчових систем, де вони можуть стабілізувати структуру продукту, впливаючи на його реологічні властивості.

З метою визначення впливу виду пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції сироваткових протеїнів було проведено порівняльний аналіз гідфрільного та гідрофобного пірогенних кремнеземів.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз вмісту білка гідрофільного та гідрофобного пірогенних кремнеземів (n=3, p≥0,95)

Зразок	Тип кремнезему	Питома поверхня, м²/г	Залишковий вміст білка, %	Ступінь адсорбції, %
Контроль	-	-	0,69	-
Гідрофільний (А-200)	Гідрофільний	200±25	0,52	24,64
Гідрофобний (М-200)	Гідрофобний	170±30	0,64	7,25

Результати експериментального дослідження продемонстрували, що тип пірогенного кремнезему має суттєвий вплив на ефективність адсорбції білків молочної сироватки. Зокрема, гідрофільний пірогенний кремнезем (А-200) показав значно вищу ефективність адсорбції, ніж гідрофобний аналог (М-200). Ступінь адсорбції білків для гідрофільного кремнезему склав 24,64 %, що майже втричі більше, ніж у гідрофобного зразка, де цей показник становив лише 7,25 %. Така відмінність пояснюється наявністю силанольних груп (-ОН) на поверхні гідрофільного кремнезему, які забезпечують формування водневих зв'язків та електростатичних взаємодій

із білковими молекулами, що значно підвищує ефективність процесу сорбції.

У той же час, гідрофобний пірогенний кремнезем через відсутність полярних груп має слабку взаємодію з білками, що призводить до значного зменшення ефективності їх адсорбції. Це узгоджується з літературними даними, які підтверджують, що білки, будучи амфіфільними молекулами, проявляють вищу спорідненість до гідрофільних поверхонь, тоді як гідрофобні матеріали ефективніші для сорбції неполярних сполук, таких як жири та жиророзчинні компоненти. Дослідження також показало, що контрольний зразок без застосування кремнезему не демонструє змін у концентрації білків, що підтверджує, що природне осадження білків у розчині без адсорбенту не відбувається.

3.1.2 Дослідження функціонально-технологічних показників гідрофільного пірогенного кремнезему.

Даний підрозділ має на меті дослідити функціонально-технологічні властивості гідрофільного пірогенного кремнезему.

Завдяки проведеному дослідженню щодо визначення впливу типу пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білків сироватки молочної ми змогли звузити фокус наших досліджень та зосередитися саме на гідрофільному пірогенному кремнеземі та різних видах його питомої поверхні.

На сьогоднішній день в асортименті українського виробника пірогенного кремнезему ТМ “Орісіл” наявні чотири види гідрофільного ПК з різними питомими поверхнями, на основі яких було проведено органолептичний, фізико-хімічний та механічний аналіз його властивостей, опис яких зазначений у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Функціонально-технологічні показники різних видів гідрофільного пірогенного кремнезему (n=3, p≥0,95).

Показник	Orisil 150	Orisil 200	Orisil 300	Orisil 380
Зовнішній вигляд	порошок білого кольору	порошок білого кольору	порошок білого кольору	порошок білого кольору
Запах	відсутній	відсутній	відсутній	відсутній
Питома поверхня, м²/г, за методом БЕТ	150±25	200±25	300±30	380±40
рН суспензії концентрацією 2 % ПК, приготовленої на дист.воді)	5,0	5,0	4,9	4,8
Об'ємна насипна густина, г/см³	0,05	0,05	0,05	0,05
Насипна густина після ущільнення, г/см³	0,11	0,11	0,10	0,11
Середній розмір частинок, нм	15–20	10–15	8–10	8–10

На основі аналізу функціонально-технологічних властивостей різних видів гідрофільного пірогенного кремнезему ТМ “Orisil” можна побачити, що всі досліджувані зразки мають ідентичні параметри, за винятком питомої поверхні, яка змінюється в діапазоні від 150 до 380 м²/г.

Зокрема, зовнішній вигляд, відсутність запаху, рН суспензії, насипна густина та середній розмір частинок залишаються практично незмінними, незалежно від величини питомої поверхні. Це дозволяє зробити важливий висновок: під час проведення подальшого дослідження щодо визначення залежності ступеня адсорбції сироваткових білків від питомої поверхні

гідрофільного пірогенного кремнезему інші фізико-хімічні фактори не будуть мати суттєвого впливу, а ключову роль у зміні ефективності адсорбції відіграватиме саме величина питомої поверхні.

3.2 Дослідження факторів впливу на адсорбцію білка сироватки молочної пірогенним кремнеземом

3.2.1 Визначення впливу питомої поверхні пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білка сироватки молочної

Метою даного підрозділу є визначення впливу питомої поверхні гідрофільного пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції протеїнів сироватки молочної.

Провівши дослідження впливу виду пірогенного кремнезему на адсорбцію сироваткових білків у попередньому розділі, було обрано за основу гідрофільний ПК. Дослідивши функціонально-технологічні властивості гідрофільного ПК було доведено майже повну ідентичність досліджуваних зразків пірогенного кремнезему за всіма показниками крім питомої поверхні.

Питома поверхня пірогенного кремнезему є одним із ключових факторів, що визначають його адсорбційні властивості щодо білків у молочній сироватці. Manyangadze et al. (2020) стверджують, що чим вища питома поверхня матеріалу, тим більше активних центрів він має для взаємодії з білковими молекулами, що потенційно підвищує ефективність адсорбції. Високодисперсні частинки кремнезему з великою питомою поверхнею можуть забезпечувати збільшену сорбційну ємність завдяки наявності значної кількості гідроксильних груп на своїй поверхні, які сприяють формуванню водневих зв'язків та електростатичних взаємодій з білками.

Відповідно до цього, наступним логічним кроком стало дослідження чотирьох зразків гідрофільного пірогенного кремнезему щодо їхньої

адсорбційної здатності білків із сироватки молочної. Більш детальна інформація зазначена у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльний аналіз адсорбції протеїнів сироватки молочної гідрофільним пірогенним кремнеземом з різними питомими поверхнями (n=3, p≥0,95).

Досліджувані зразки	Питома поверхня, м²/г	Залишковий вміст білка, %	Ступінь адсорбції білка, %
Сироватка молочна (контроль)	—	0,69	0
Сироватка молочна + Орисіл 150	150	0,57	17,39
Сироватка молочна + Орисіл 200	200	0,52	24,64
Сироватка молочна + Орисіл 300	300	0,39	43,48
Сироватка молочна + Орисіл 380	380	0,47	31,88

На основі проведеного дослідження було встановлено, що зі збільшенням питомої поверхні адсорбційна здатність матеріалу зростає, що підтверджує важливість цього параметра при виборі адсорбенту для технологічних процесів очищення та переробки сироватки. Найвищий ступінь адсорбції білка (43,48 %) спостерігався при використанні “Орисіл

300” (300 м²/г), тоді як “Орісіл 150” (150 м²/г) забезпечив найнижчий ступінь адсорбції серед досліджуваних зразків (17,39 %).

Однак, надмірне збільшення питомої поверхні (до 380 м²/г) призвело до зниження ефективності адсорбції (31,88 %), що може бути пов’язано з утворенням гідратованих оболонок на поверхні матеріалу або зміною механізму взаємодії між білками та адсорбентом.

Ці дослідження також підтверджують інформацію Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника (н.д.), де було зазначено, що для ентеросорбенту “Силікс” використовується високодисперсний кремнезем із питомою поверхнею 300 ± 30 м²/г . Поверхня його частинок вкрита гідроксильними групами, що зумовлює високу гідрофільність, білоксорбуючу активність і здатність зв’язувати мікроорганізми, що робить Силікс ефективним ентеросорбентом.

3.2.2 Визначення впливу кількості пірогенного кремнезему на ступінь адсорбції білків сироватки молочної

Даний підрозділ має на меті дослідити вплив обсягу наважки гідрофільного ПК внесеного до сироватки молочної на ефективність адсорбції сироваткових протеїнів.

Завдяки попереднім дослідженням було встановлено, що гідрофільний пірогенний кремнезем з питомою поверхнею 300 м²/г потенційно є найбільш ефективним в контексті адсорбції сироваткових протеїнів, що дозволяє зосередити дослідження саме на цьому типі та питомій поверхні пірогенного кремнезему для подальшого визначення впливу внесеної наважки на ступінь адсорбції.

У рамках нашого дослідження було вивчено вплив кількості внесеного гідрофільного пірогенного кремнезему на адсорбцію білків молочної сироватки. Результати представлені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Залежність масової частки білка в молочній сироватці від кількості внесеного гідрофільного пірогенного кремнезему.

Зразок	Масова частка загального білка (%)	Відносне зниження білка (%)
Сироватка молочна (контроль)	1,1	0
Сироватка молочна + 0.25% кремнезему	0,91±0,03	17,27
Сироватка молочна + 0.50% кремнезему	0,71±0,03	35,45
Сироватка молочна + 0.75% кремнезему	0,68±0,03	38,18
Сироватка молочна + 1% кремнезему	0,62±0,03	43,64
Сироватка молочна + 1.5% кремнезему	0,50±0,02	54,55
Сироватка молочна + 2% кремнезему	0,49±0,02	55,45

Таблиця містить дані щодо впливу різної масової частки гідрофільного пірогенного кремнезему на концентрацію загального білка у молочній сироватці. Контрольний зразок без додавання кремнезему має початкову масову частку білка 1.10 %.

Зі збільшенням масової частки внесеного кремнезему спостерігається закономірне зменшення концентрації загального білка, що свідчить про ефективну адсорбцію білкових сполук на поверхні сорбенту. Відносне зниження білка зростає від 17.27 % при додаванні 0.25 % кремнезему до 55.45 % при 2 % кремнезему.

Встановлено, що зі збільшенням кількості внесеного об'єму пірогенного кремнезему адсорбційна здатність матеріалу зростає, що підтверджує важливість цього параметра для технологічних процесів очищення та переробки сироватки.

Для того, щоб краще відобразити цю тенденцію, побудовано графік, на якому відображена залежність залишкової масової частки білка від кількості внесеного гідрофільного пірогенного кремнезему. Графік дозволяє чітко прослідкувати основні закономірності адсорбційного процесу та визначити оптимальні умови для найбільш ефективного видалення білків із сироватки.

Графік залежності залишкової масової частки білка від кількості внесеного гідрофільного пірогенного кремнезему зображено на рисунку 3.2.

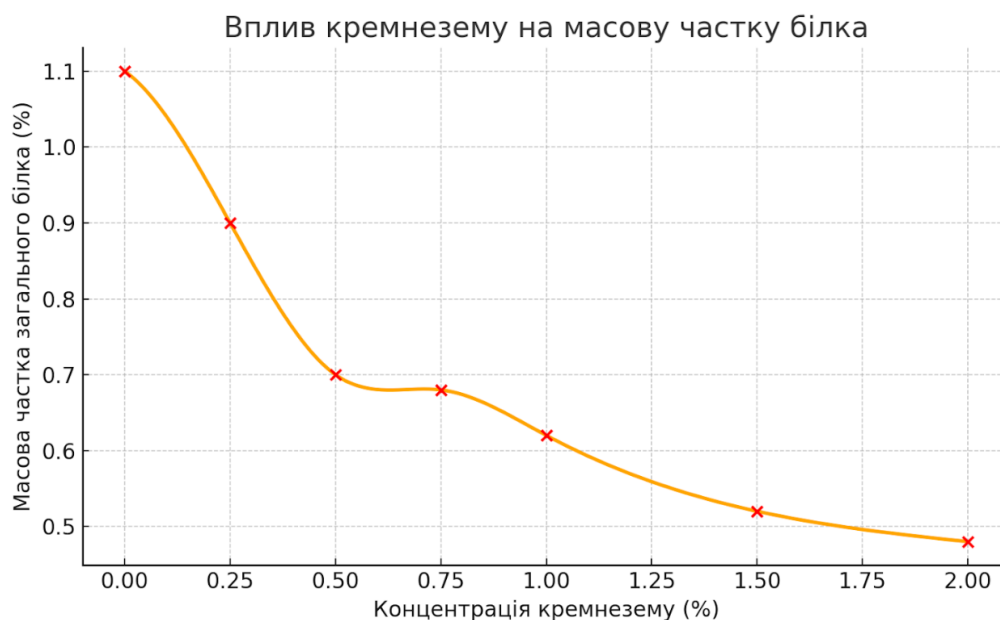


Рисунок 3.2 — Вплив кількості внесеного гідрофільного пірогенного кремнезему на залишкову масову частку білка у фільтраті

Даний графік демонструє негативну кореляцію між масовою часткою внесеного пірогенного кремнезему та залишковою концентрацією білка у сироватці. Починаючи з контрольного зразка (1.10 % білка), із збільшенням

концентрації кремнезему від 0.25 % до 2 % масова частка білка поступово знижується.

Помітно, що при концентраціях 1.5 % і 2 % рівень зниження білка стабілізується (~55.45 %), що може вказувати на досягнення межі адсорбційної здатності пірогенного кремнезему.

3.2.3 Дослідження впливу температури на ступінь адсорбції білків сироватки молочної

Метою даного підрозділу є дослідження впливу температури сироватки молочної на активність адсорбції білків пірогенним кремнеземом.

У рамках нашого дослідження було вивчено вплив температури на адсорбцію білків із молочної сироватки пірогенним кремнеземом. Результати представлені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Залежність масової частки білка в молочній сироватці після адсорбції пірогенним кремнеземом від температури

Температура, °С	Масова частка білка, %
20	0,75± 0,02
30	0,64± 0,02
40	0,55± 0,02
45	0,5± 0,02
50	0,49± 0,02

Дослідження визначення впливу температури молочної сироватки на ефективність адсорбції білків пірогенним кремнеземом включали етапи представлені на рисунку 3.3.

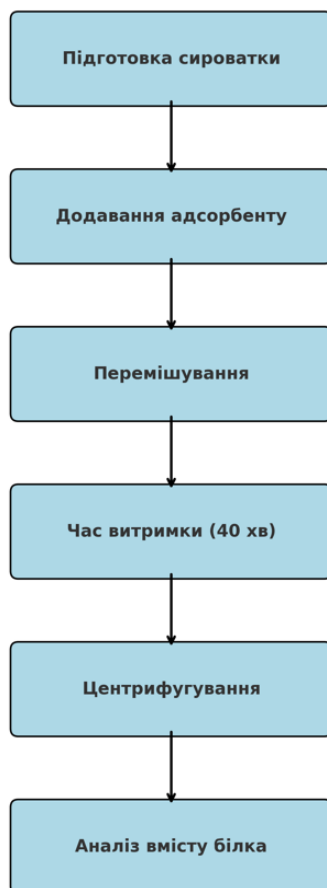


Рисунок 3.3 — Блок-схема етапів підготовки сироватки молочної для адсорбції білків пірогенним кремнеземом

На основі результатів табличних даних було побудовано поліноміальна апроксимацію залежності масової частки білка від температури побудованої за допомогою квадратичного полінома.

$$y=0.0001324x^2 - 0.01821x+1.063 \quad (3.1)$$

де:

xxx — температура, °C,

ууу — масова частка білка, %.

Отримане рівняння апроксимації розраховується за формулою: Графік залежності ступеня адсорбції білка у сироватці молочній пірогенним кремнеземом від температури зображено на рисунку 3.4.

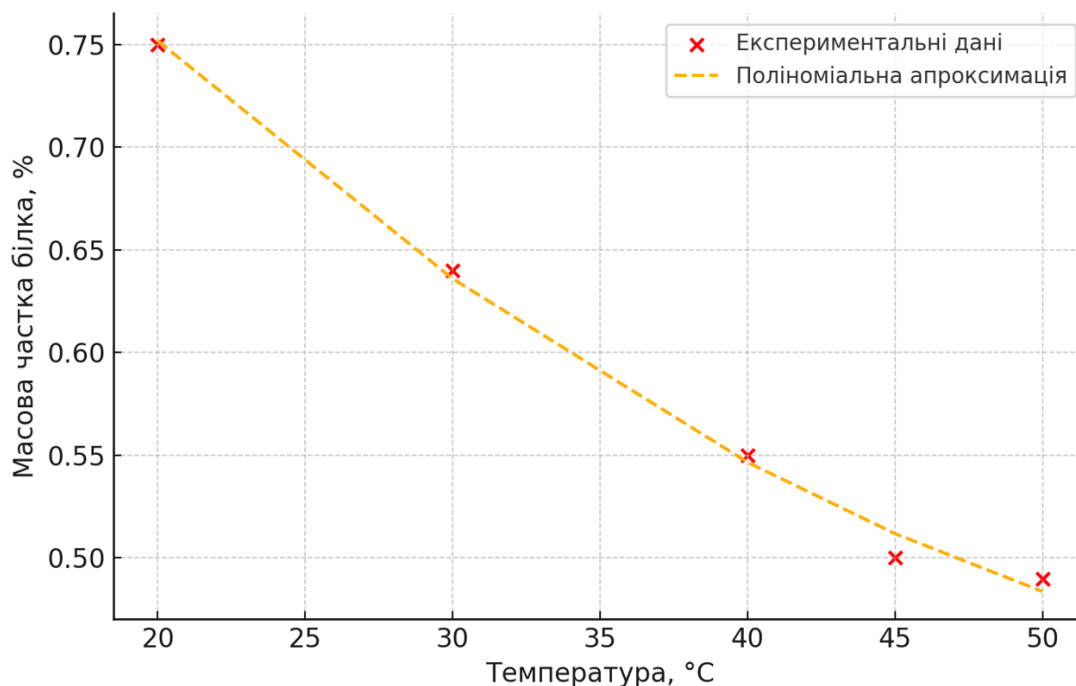


Рисунок 3.4 — Залежність залишкової масової частки білка в сироватці молочній після адсорбції пірогенним кремнеземом за різних температур

Червоні точки представляють експериментальні дані, а пунктирна лінія – поліноміальну апроксимацію цієї залежності. Це засвідчує, що підвищення температури сприяє зменшенню залишкової концентрації білка в сироватці, що свідчить про покращення ефективності процесу адсорбції. Однак, після 45°C зменшення масової частки білка стає менш вираженим, що може вказувати на насичення адсорбційних центрів або зміни в структурі білкових молекул.

3.2.4 Дослідження впливу ультразвукового оброблення на ступінь адсорбції

Мета даного підрозділу полягає в дослідженні ступеня адсорбції сироваткових білків пірогенним кремнеземом шляхом застосування ультразвукового диспергування.

Для підвищення ефективності адсорбції білків доцільно створювати умови, які сприятимуть переведенню частинок пірогенного кремнезему до первинного нанорозмірного стану. Це може бути досягнуто шляхом

використання ультразвукового диспергування суспензії, що дозволить зменшити агрегацію наночастинок і забезпечить рівномірний розподіл активних центрів. Дослідження Heade et al. (2021) свідчать, що використання диспергованих частинок пірогенного кремнезему сприяє більш рівномірному покриттю білкових молекул, що підвищує ефективність процесу адсорбції.

Ультразвукову обробку здійснювали при частоті $22 \pm 1,50$ кГц та інтенсивності впливу в межах 7–10 за відносною шкалою. Тривалість експозиції змінювали в діапазоні від 1 до 5 хв, а об'єм реакційної камери становив 200 см^3 . Результати представлені в таблиці 3.6 та рисунку 3.5.

Таблиця 3.6 – Залежність адсорбції білка від часу та інтенсивності під час ультразвукового оброблення ($n=3$, $p \geq 0,95$).

Час експозиції (хв)	Інтенсивність (відносна)	Ступінь адсорбції (%)	Залишковий білок (%)
1	7	51.77	0.4196
1	8	52.79	0.4107
1	9	51.42	0.4226
1	10	50.83	0.4278
2	7	50.54	0.4303
2	8	53.25	0.4067
2	9	53.36	0.4058
2	10	52.69	0.4116
3	7	51.25	0.4241
3	8	53.38	0.4056
3	9	54.03	0.3999
3	10	58.03	0.3651

4	7	50.45	0.4311
4	8	52.53	0.413
4	9	58.65	0.3597
4	10	60.57	0.343
5	7	50.5	0.4306
5	8	54.82	0.3931
5	9	58.93	0.3573
5	10	62.87	0.323

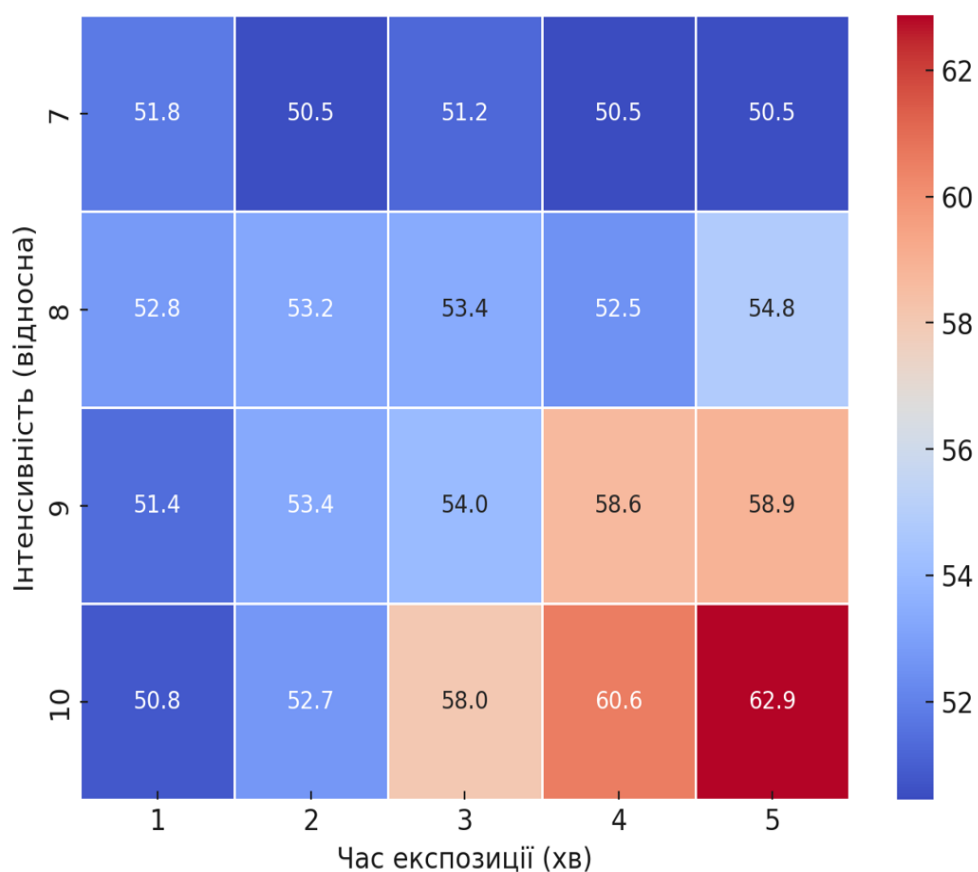


Рисунок 3.5 — Теплокарта залежності адсорбції білка від часу та інтенсивності під час ультразвукового оброблення

Дослідження ступеня адсорбції білка пірогенним кремнеземом під час ультразвукової обробки підтвердило істотний вплив параметрів

процесу, зокрема інтенсивності ультразвукового впливу та тривалості експозиції. Аналіз отриманих даних свідчить, що збільшення часу обробки від 1 до 5 хвилин супроводжується поступовим зростанням ступеня адсорбції, особливо за вищих рівнів інтенсивності. Це вказує на накопичувальний ефект дії ультразвуку, який сприяє покращенню міжфазної взаємодії білків з поверхнею кремнезему.

На тепловій карті простежується позитивна динаміка зростання адсорбції зі збільшенням інтенсивності ультразвуку в усьому діапазоні (7–10 одиниць). Найнижчі значення (приблизно 50–52 %) зафіксовані при короткому часі (1–2 хв) незалежно від інтенсивності. Водночас найвищий ступінь адсорбції білків (до 62,87 %) досягався при максимальній інтенсивності (10 одиниць) та максимальному часі обробки (5 хвилин).

Особливо помітне зростання ефективності адсорбції спостерігалось на інтенсивностях 9 та 10, починаючи з 3 хвилини обробки. Наприклад, при інтенсивності 10 спостерігається сталий приріст ефективності від 50,83 % (1 хв) до 62,87 % (5 хв). У свою чергу, на інтенсивності 7 приріст був незначним і залишався в межах 50,4–51,7 % протягом усього діапазону часу.

Таким чином, результати дослідження демонструють чітко виражену залежність ефективності адсорбції від комбінації двох параметрів — часу та інтенсивності ультразвуку, з максимальною адсорбційною активністю при поєднанні тривалого впливу (4–5 хв) з високою інтенсивністю (10 умовних одиниць).

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність використання ультразвукової обробки для покращення адсорбційних властивостей білка на пірогенному кремнеземі. Проте варто зазначити, що в промислових умовах ультразвукові установки на підприємствах переважно відсутні, тому подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методик, адаптованих до наявних технічних можливостей

виробничих підприємств, із метою впровадження ефективних технологічних рішень.

3.3 Встановлення раціональних параметрів адсорбції протеїнів сироватки молочної гідрофільним пірогенним кремнеземом.

Метою даного підрозділу є встановлення раціональних параметрів адсорбції сироваткових протеїнів пірогенним кремнеземом.

В підрозділі 3.2 було досліджено вплив таких чинників, як температура, кількість внесеної наважки, тип та питома поверхня пірогенного кремнезему.

Для оптимізації параметрів адсорбції сироваткових білків пірогенним кремнеземом та доведення доцільності його реалізації в промислових масштабах нами було проведено серія досліджень з підбору параметрів, що представлені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Технологічні параметри та вміст білка після адсорбції сироватки молочної пірогенним кремнеземом (n=3, p≥0,95)

№ досліджу	Масова частка пірогенного кремнезему (%)	Температура (°C)	Масова частка загального білка (%)
1	0	20	1.10
2	0	30	1.09
3	0	40	1.10
4	0	45	1.10
5	0	50	1.11
6	0.25	20	1.02
7	0.25	30	0.96
8	0.25	40	0.94
9	0.25	45	0.91

10	0.25	50	0.91
11	0.50	20	0.92
12	0.50	30	0.83
13	0.50	40	0.76
14	0.50	45	0.71
15	0.50	50	0.71
16	0.75	20	0.87
17	0.75	30	0.80
18	0.75	40	0.75
19	0.75	45	0.68
20	0.75	50	0.67
21	1	20	0.81
22	1	30	0.73
23	1	40	0.67
24	1	45	0.62
25	1	50	0.61
26	1.5	20	0.75
27	1.5	30	0.64
28	1.5	40	0.55
29	1.5	45	0.50
30	1.5	50	0.49
31	2.0	20	0.72
32	2.0	30	0.62
33	2.0	40	0.54

34	2.0	45	0.49
35	2.0	50	0.48

Для визначення рекомендованих режимів для адсорбції білка із сироватки молочної пірогенним кремнеземом було розроблено відповідні матриці з розрахованими значеннями адсорбції білка за різного співвідношення між змінними параметрами, такі як температура сироватки молочної і масова частка внесеного пірогенного кремнезему.

Моделі оптимізації адсорбції білка зводили до завдання регресійного аналізу експериментальних даних методом багатовимірної апроксимації. Для оптимізації функцій відгуку з метою розробки рекомендацій щодо визначення масової частки загального білка була використана методологія поверхні відгуку за допомогою графічної 3D моделі.

Незалежними параметрами, якими варіювали значення, було обрано температуру (y) в діапазоні від 20°C до 50°C та масову частку пірогенного кремнезему (x) в діапазоні від 0 % до 2 %.

У загальному вигляді функція відгуку описується таким поліномом:

$$Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \quad (3.2)$$

Примітка:

YYY – ступінь адсорбції білка (%);

xxx – масова частка пірогенного кремнезему (%);

ууу – температура сироватки (°C);

$b_0 \dots b_5$ – коефіцієнти регресійної моделі.

Для рекомендованих режимів адсорбції білка із сироватки молочної пірогенним кремнеземом рівняння регресії має вигляд:

$$Y(x, y) = 1.268 - 0.442 \cdot x + 0.0162 \cdot x^2 - 0.008 \cdot y + 0.00007 \cdot y^2 - 0.004 \cdot x \cdot y \quad (3.3)$$

Де:

Y – ступінь адсорбції білка;

x – масова частка пірогенного кремнезему, %;

y – температура, °С.

Перевірка адекватності отриманої моделі здійснювалася шляхом обчислення середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}, \quad (3.4)$$

де \hat{y}_i – значення, розраховані за допомогою регресійного рівняння, y_i – значення експериментальних даних. Відповідно до формули (3.4) їх значення складає: $\sigma Y = 0,03$ %.

На рисунку 3.6 та 3.7 наведено графічні залежності адсорбції білка від масової частки пірогенного кремнезему та температури.

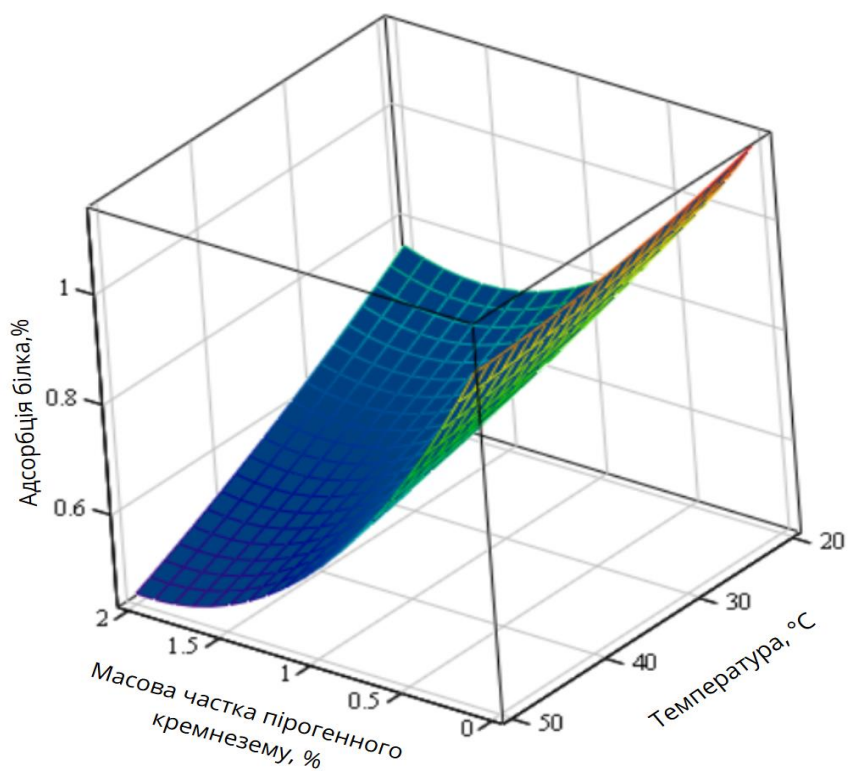


Рис.3.6 – Графічна залежність адсорбції білка (Y) від масової частки пірогенного кремнезему (x) та температури (y).

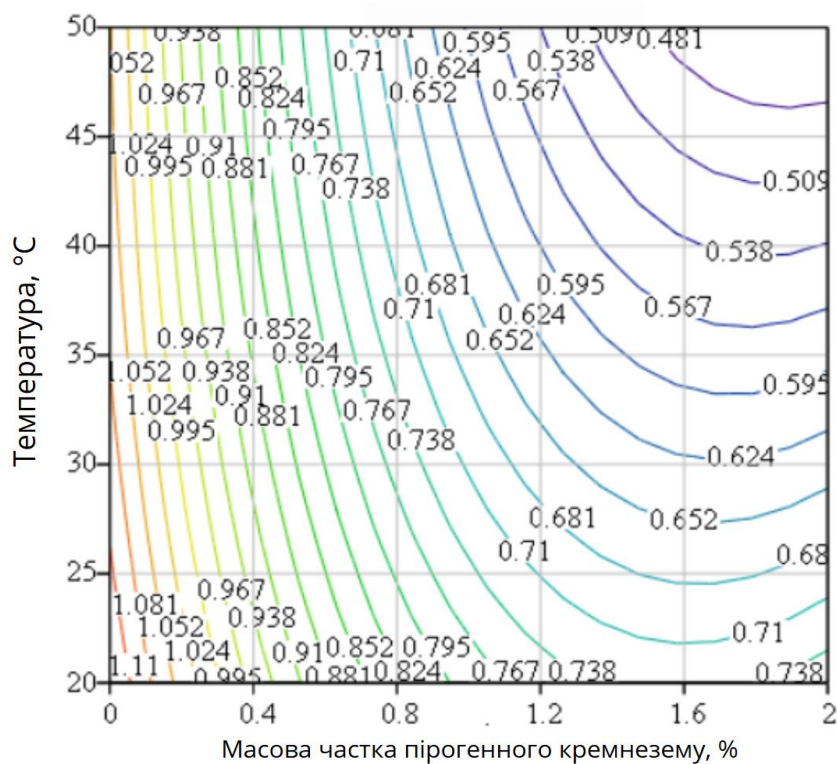


Рис.3.7 – Контурний графік залежності адсорбції білка (Y) від масової частки пірогенного кремнезему (x) та температури (y).

Відповідно до результатів моделювання встановлено, що оптимальними умовами для адсорбції білка із сироватки молочної пірогенним кремнеземом є зразок № 29 (1.5 % пірогенного кремнезему за температури сироватки молочної 45 °С), що дозволяє адсорбувати 54,55 % білка із досліджуваного зразка сироватки молочної.

3.4 Дослідження фракційного складу білків молочної сироватки: електрофоретичний аналіз та адсорбційні властивості

Метою даного підрозділу є дослідження фракційного складу білків адсорбованих пірогенним кремнеземом.

В підрозділі 3.3 було досліджено, що оптимальними умовами для адсорбції білка із сироватки молочної пірогенним кремнеземом є технологічний процес із внесенням 1.5 % пірогенного кремнезему за температури сироватки молочної 45 °С, що дозволяє продовжити дослідження якісного складу протеїнів сироватки молочної за визначених параметрів.

Розуміння якісного складу адсорбованих білків дозволяє проаналізувати селективність адсорбції різних фракцій білків, що є важливим для оцінки ефективності процесу та можливості його подальшого застосування у харчовій промисловості. Адсорбційні властивості пірогенного кремнезему можуть залежати не лише від загальної кількості зв'язаного білка, але й від його молекулярної маси, ізоелектричної точки та структури. Визначення фракційного складу білків, які переважно піддаються адсорбції, дозволить оцінити механізм взаємодії білків із поверхнею пірогенного кремнезему, що є необхідним для прогнозування ефективності даної технології у процесах очищення та модифікації молочних сироваток.

Для дослідження якісного та кількісного складу протеїнів сироватки молочної застосовуються різні методи. Так, наприклад у статті El Hatmi et

al. (2015) для визначення якісного та кількісного складу сироваткових білків був застосований метод електрофоретичного аналізу білків.

З огляду на високу ефективність цього методу, у своєму дослідженні для визначення якісного та кількісного вмісту білків у сироватці молочній, нами було використано метод електрофорезу у (ПААГ) у присутності денатуруючого агенту (ДСН). Цей метод забезпечує високу точність розділення білків за молекулярною масою, що дозволяє не тільки оцінити кількісні зміни вмісту білків, але й дослідити механізми їхнього зв'язування з кремнеземом.

Для кількісного визначення білків у зразках було проведено спектрофотометричний аналіз, результати якого наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати спектрального аналізу та розрахунки концентрації протеїну у досліджуваних зразках сироватки молочної.

№	280 нм	320 нм	ΔA (280–320 нм)	C, мг/см ³
1	0,4423	0,2294	0,2129	10.645
2	0,2113	0,0491	0,1622	8,11
3	0,2279	0,0634	0,1645	8,225

Примітка:

- 1– сироватка молочна (контроль);
- 2 – сироватка молочна, оброблена адсорбентом SiO₂;
- 3 – адсорбент SiO₂ після оброблення сироватки молочної.

Результати електрофоретичного аналізу (рис. 3.8) підтверджують наявність білкових зон у контрольному зразку молочної сироватки, а також у фракціях, що залишилися після осадження білків кремнеземом. Виявлені

поліпептиди мають молекулярну масу 25, 35, 55, 70 та 80 кДа, що дозволяє припустити, що вони відповідають основним білковим компонентам молока.

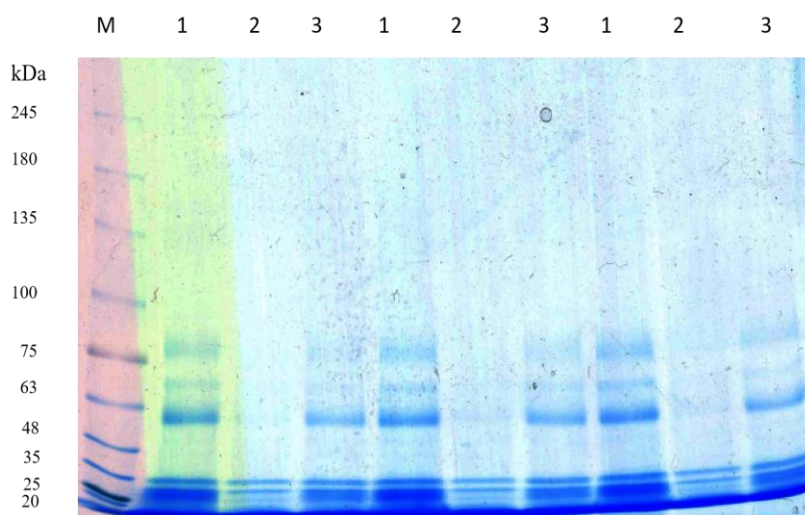


Рисунок 3.8 – Результати визначення протеїнового складу сироватки молочної методом електрофорезу у 4-17 % ПААГ.

Примітка:

1,4,7 – сироватка молочна (контроль);

2,5,8 – сироватка молочна, оброблена пірогенним кремнеземом;

3,6,9 – осад пірогенного кремнезему (внесення 100мкг/лунку).

Згідно результатів денситометрії, було виявлено поліпептидні зони у молочній сироватці контролі та осаді пірогенного кремнезему із молекулярною масою 25, 35, 55, 70 та 80 кДа (що можуть відповідати мономеру, димеру, тримеру та олігомеру казеїну, лактоферину, сироватковому альбуміну).

Однак, у обробленій молочній сироватці було виявлено зниження вмісту протеїнів за усім спектром сироваткових білків, що свідчить про адсорбцію протеїнів пірогенним кремнеземом. Відносний вміст протеїну за різними діапазонами зазначено на рисунку 3.9.

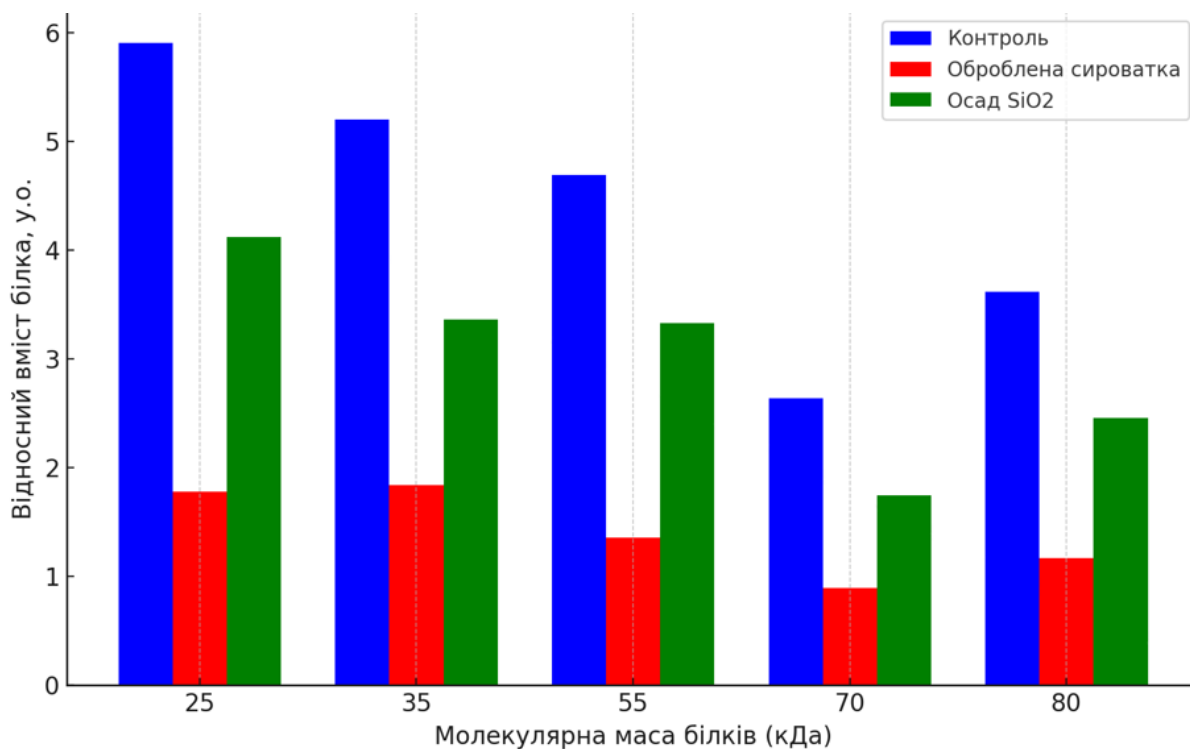


Рисунок 3.9 – Відносний вміст протеїнів у діапазоні Mm 20-245 кДа.

Аналіз розподілу білків у різних зразках після обробки пірогенним кремнеземом проведено на основі їхнього відносного вмісту у діапазоні молекулярних мас 25..80 кДа. Дослідження включало три експериментальні групи: контрольний зразок молочної сироватки (без обробки), оброблена молочна сироватка (після взаємодії з SiO₂) та осад пірогенного кремнезему (білки, що зв'язалися з SiO₂).

У результаті проведеного електрофоретичного аналізу фракційного складу білків у супернатанті та осаді після адсорбції дозволив охарактеризувати ступінь вилучення окремих білкових фракцій. Для білків з молекулярною масою 55–80 кДа (лактоферин, сироватковий альбумін) у рідкій фазі залишалося 29–35 % білка, що свідчить про перехід 65–71 % у тверду фазу. Для білків з масою 25–35 кДа (β-лактоглобулін, α-лактальбумін) залишковий вміст у розчині складав 30–35 %, тобто ступінь адсорбції перебував у межах 65–70 %.

Отримані результати свідчать про відсутність вираженої селективності пірогенного кремнезему щодо конкретного молекулярного класу білків. Це дає підстави вважати, що основними факторами, які визначають адсорбційну здатність білків у системі «сироватка молочна – наночастинки SiO₂», є неспецифічні взаємодії, зокрема водневі зв'язки, електростатичне притягання та гідрофобні ефекти, а не лише молекулярна маса. Вірогідно, додаткову роль відіграють ізоелектричні точки білків, їх структурна конформація та амінокислотний склад поверхні, що контактує з адсорбентом.

3.5 Дослідження мінерального складу сироватки молочної після адсорбції пірогенним кремнеземом

Метою даного підрозділу є дослідження мінерального складу сироватки молочної після адсорбції пірогенним кремнеземом. Висунута гіпотеза передбачає, що, окрім зменшення вмісту білкових сполук у сироватці, обробка пірогенним кремнеземом може сприяти збагаченню сироватки кремнієм, що підвищує її потенційну цінність у контексті подальшого використання, зокрема у виробництві сироваткових напоїв. Кремній є важливим мікроелементом, що бере участь у формуванні сполучних тканин, зміцненні кісток і підтримці еластичності судин, тому його додавання до харчових продуктів може мати позитивний вплив на здоров'я людини.

У зв'язку з цим було проведено аналіз мінерального складу сироватки молочної до і після адсорбції білків пірогенним кремнеземом. Для цього було визначено вміст кремнію (Si) у контрольному зразку сироватки та у зразку після обробки. Отримані результати наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Вміст кремнію у сироватці молочної.

Показник	Довжина хвилі, нм	Вміст кремнію, мг/л	Похибка (±m)	RSD, %	LOD, мг/л
-----------------	------------------------------	------------------------------------	-------------------------	---------------	------------------

Контрольний зразок (без обробки)	282.851	2.12	0.012	0.55	0.0056
Після адсорбції (ПК)	282.851	205.72	2.27	1.16	0.0056

Аналіз отриманих даних свідчить про значне зростання вмісту кремнію в сироватці після обробки пірогенним кремнеземом. У контрольному зразку концентрація кремнію становила 2,12 мг/л, тоді як після адсорбції білка цей показник зріс майже у 97 разів, досягнувши 205,72 мг/л.

Такий значний приріст концентрації Si можна пояснити інтенсивним переходом частинок кремнезему у сироваткову фазу під час адсорбції білка. Оскільки пірогенний кремнезем є джерелом аморфного SiO₂, його диспергування у рідкому середовищі сприяє розчиненню частини мінералу та підвищенню рівня кремнію в обробленій сироватці.

Зважаючи на отримані результати, можна зробити висновок, що сироватка, оброблена пірогенним кремнеземом, може набути додаткової харчової цінності, оскільки містить значну кількість біодоступного кремнію. Це відкриває перспективи її використання у виробництві функціональних сироваткових напоїв, особливо для груп населення, які потребують додаткового надходження мікроелементів (наприклад, людей похилого віку, спортсменів тощо).

Таким чином, дослідження підтвердило, що окрім зниження вмісту білка, обробка пірогенним кремнеземом також змінює мінеральний склад сироватки, що може бути корисним для її подальшого використання у харчових технологіях.

3.6 Дослідження здатності пірогенного кремнезему до сорбції радіонуклідів

Даний підрозділ має на меті дослідити здатність пірогенного кремнезему до сорбції радіонуклідів в сироватці молочній.

Проблема радіоактивного забруднення харчових продуктів, зокрема молочної продукції, залишається актуальною навіть через десятиліття після аварії на Чорнобильській АЕС. Одним із основних шляхів потрапляння радіонуклідів в організм людини є харчовий ланцюг, у якому особливе місце займають молочні продукти. Відомо, що довгоживучі ізотопи, такі як ^{137}Cs , можуть накопичуватися у ґрунті, рослинних і тваринних тканинах, а відтак і в молоці. Дослідження вчених з Великобританії та України підтверджують, що навіть у віддалений період після аварії молоко в окремих регіонах залишається забрудненим радіонуклідами, що вимагає пошуку ефективних методів очищення молочної сировини (Поліщук, 2023).

Дослідження науковців Національного університету харчових технологій засвідчили, що введення пірогенного кремнезему до незбираного молока дозволяє знизити вміст ^{137}Cs на 17–44 %, залежно від питомої поверхні сорбенту та його концентрації у середовищі.

Механізм дії пірогенного кремнезему полягає в утворенні комплексів з білковими молекулами, що, своєю чергою, сприяє зв'язуванню радіоактивних елементів у вигляді нерозчинних агрегатів, які можна видалити шляхом осадження та подальшої утилізації. Важливо зазначити, що процес сорбції ^{137}Cs супроводжується зменшенням вмісту білка у молочній сироватці, що може впливати на її технологічні та харчові властивості. Тому використання даного методу є найбільш доцільним для очищення молочної сироватки, яка надалі може бути використана у виробництві напоїв функціонального призначення, тоді як утворений осад підлягає утилізації відповідно до вимог поводження з радіоактивно забрудненими відходами.

Додатково слід зазначити, що використання пірогенного кремнезему як харчової добавки регулюється відповідними нормами, зокрема Регламентом Європейського парламенту та Ради ЄС № 1333/2008, що встановлює вимоги до безпечності харчових добавок (Регламент ЄС, 2008)³. Це підтверджує потенційну можливість використання діоксиду кремнію у харчовій промисловості з метою радіопротекторного очищення.

Для експериментального дослідження радіопротекторних властивостей пірогенного кремнезему було використано молоко, отримане з Рокитнівського району Рівненської області – регіону, що зазнав значного впливу радіонуклідів після аварії на Чорнобильській АЕС. З молока виділяли сироватку шляхом термокислотної коагуляції, що дозволило отримати середовище з рН у межах 5,46–5,71.

Як адсорбент було застосовано гідрофільний пірогенний кремнезем "Орісіл 300", який вводили у концентрації 1 % від об'єму сироватки. Після додавання сорбенту проби піддавали ультразвуковій (УЗ) обробці з інтенсивністю 8 протягом 3...5 хвилин, що сприяло рівномірному розподілу частинок сорбенту та покращенню його взаємодії із забруднюючими компонентами.

Отримані результати свідчать про значне зниження рівня радіоактивного забруднення у дослідних зразках. У таблиці 3.10 наведено зміну концентрації ^{137}Cs у сироватці після її обробки пірогенним кремнеземом у різних експериментальних умовах.

Таблиця 3.10 — Зміна концентрації ^{137}Cs у сироватці молочній після обробки пірогенним кремнеземом

Зразок	pH	УЗ (тривалість., хв)	^{137}Cs (Бк/л)	Ступінь очищення (%)
СМ (контроль)	5,46		388±9	
Сироватка очищена ПК		3	312±9	19,6
Сироватка очищена ПК		5	292±8	24,7
СМ (контроль)	5,71		379±9	
Сироватка очищена ПК		3	280±9	26,1
Сироватка очищена ПК		5	248±8	34,6

Результати експерименту демонструють ефективність застосування пірогенного кремнезему для сорбції радіонуклідів із молочної сироватки. У вихідних зразках (контрольні проби) концентрація ^{137}Cs становила 388 та 379 Бк/л відповідно для середовищ із рН 5,46 та 5,71. Після 3-хвилинної обробки зразків концентрація ^{137}Cs зменшилася на 19,6–26,1 %, що свідчить про достатньо швидку взаємодію сорбенту з радіоактивними елементами. Подальше збільшення часу УЗ-обробки до 5 хвилин сприяло ще більшому зниженню рівня радіонуклідів – до 24,7–34,6 %, що підтверджує позитивний вплив додаткового часу контакту сорбенту із сироваткою

молочною. Вищий рівень очищення спостерігався у середовищі з рН 5,71, де ступінь видалення ^{137}Cs досягав 34,6 % після 5-хвилинної обробки.

3.7 Дослідження доцільності використання пірогенного кремнезему в якості антизлежувальної добавки

Даний підрозділ має на меті дослідити вплив пірогенного кремнезему на взаємодію із сухою молочною сироваткою щодо покращення її антизлежувальних властивостей.

Одним із пріоритетних завдань харчової промисловості є забезпечення стабільності концентрованих сухих продуктів, зокрема молочної сироватки, у процесі зберігання. Це питання набуває особливої значущості в умовах, коли суха сироватка молочна становить суттєву частку експортних поставок з України, зокрема до регіонів із жарким кліматом, де дотримання стабільності якості продукції впродовж усього строку зберігання викликає додаткові труднощі.

Перспективним напрямом підвищення стабільності сухих харчових продуктів є використання харчових добавок з антизлежувальними властивостями (АЗХД). Основне їх призначення полягає у запобіганні агрегації частинок та їх налипанню на тверді поверхні. Відповідно до Регламенту ЄС щодо харчових добавок (European Parliament and Council, 2008), діоксид кремнію дозволено до застосування як антизлежувальну речовину у складі сухих харчових продуктів, зокрема й молочних.

Під час вибору харчових інгредієнтів основними критеріями виступають їхня якість, безпечність та наявність вітчизняного виробництва, що дозволяє знизити логістичні ризики та зменшити собівартість готової продукції. В Україні пірогенний діоксид кремнію виробляється на підприємстві «Орісіл», розташованому в місті Калуш Івано-Франківської області. Цей виробник спеціалізується на виготовленні високодисперсного аморфного діоксиду кремнію (SiO_2), який отримують методом полум'яного гідролізу чотирихлористого кремнію (SiCl_4). Ще одним українським

виробником пірогенного кремнезему та його модифікованих форм (марки А-300, А-380) є ДП «Калуський дослідно-експериментальний завод Інституту хімії поверхні НАН України ім. О.О. Чуйка».

На сьогодні існує обмежена кількість даних щодо використання вітчизняного пірогенного діоксиду кремнію у технологіях виробництва молочних продуктів. Недостатньо дослідженими залишаються закономірності його дії, науково-практичні передумови застосування, а також механізми взаємодії з компонентами молочної сировини, що зумовлює потребу у проведенні подальших ґрунтовних досліджень.

Суша молочна сироватка є концентрованим харчовим продуктом, що перебуває в аморфному метастабільному стані, через що вона чутлива до коливань температури та вологості під час зберігання. До основних факторів, які зумовлюють погіршення її якості, належать фізичні, хімічні та біохімічні процеси, зокрема втрата або міграція вологи, що може призводити до злежування, а також ферментативні й неферментативні реакції, які викликають потемніння продукту (Karel M. & Lund D.B., 2003; Kilcast & Subramaniam, 2000).

Інтенсивність зазначених процесів значною мірою залежить від зовнішніх умов, зокрема температури та відносної вологості повітря, а також від внутрішніх характеристик продукту – його хімічного складу, рівня кислотності та активності води. (Schuck та ін., 2005; Silalai & Roos, 2010).

Для підвищення якості, запобігання псуванню харчових продуктів та подовження їхнього терміну зберігання застосовують різні технологічні підходи, зокрема спеціалізовані режими обробки та умов зберігання. Одним з ефективних методів стабілізації сухих молочних продуктів є використання антизлежувальних харчових добавок.

На сьогодні у харчовій промисловості дозволено застосування багатьох засобів для запобігання злежуванню (European Parliament and

Council, 2008). Ці харчові добавки поділяються на кілька основних груп: сполуки кальцію, натрію, магнію, кремнію та інші. Переважна більшість із них отримується з природної сировини. Виробники акцентують увагу на їхніх додаткових перевагах — окрім забезпечення сипучості, такі добавки сприяють збагаченню продукту цінними мікроелементами.

У дослідженні (Yarici, Karakuzu-İkizler & Yücel, 2021) проаналізовано сучасні стратегії запобігання злежуванню порошкоподібних харчових продуктів. Особливу увагу приділено механізмам дії антизлежувальних агентів, а також характеристикам сполук, які найчастіше застосовуються у харчовій промисловості, зокрема при виробництві та зберіганні сухих молочних продуктів.

Антизлежувальні добавки можуть мати як простий склад, представлені одним активним компонентом, наприклад діоксидом кремнію, так і бути багатокомпонентними сумішами. Зокрема, канадськими дослідниками був розроблений і запатентований комплексний антизлежувальний засіб, призначений для зменшення липкості шматочкового або тертого сиру. До його складу входять дрібнозернисте рослинне борошно, бентоніт, целюлоза та антимікотичні компоненти. (Malireddy S. Reddy, 1996).

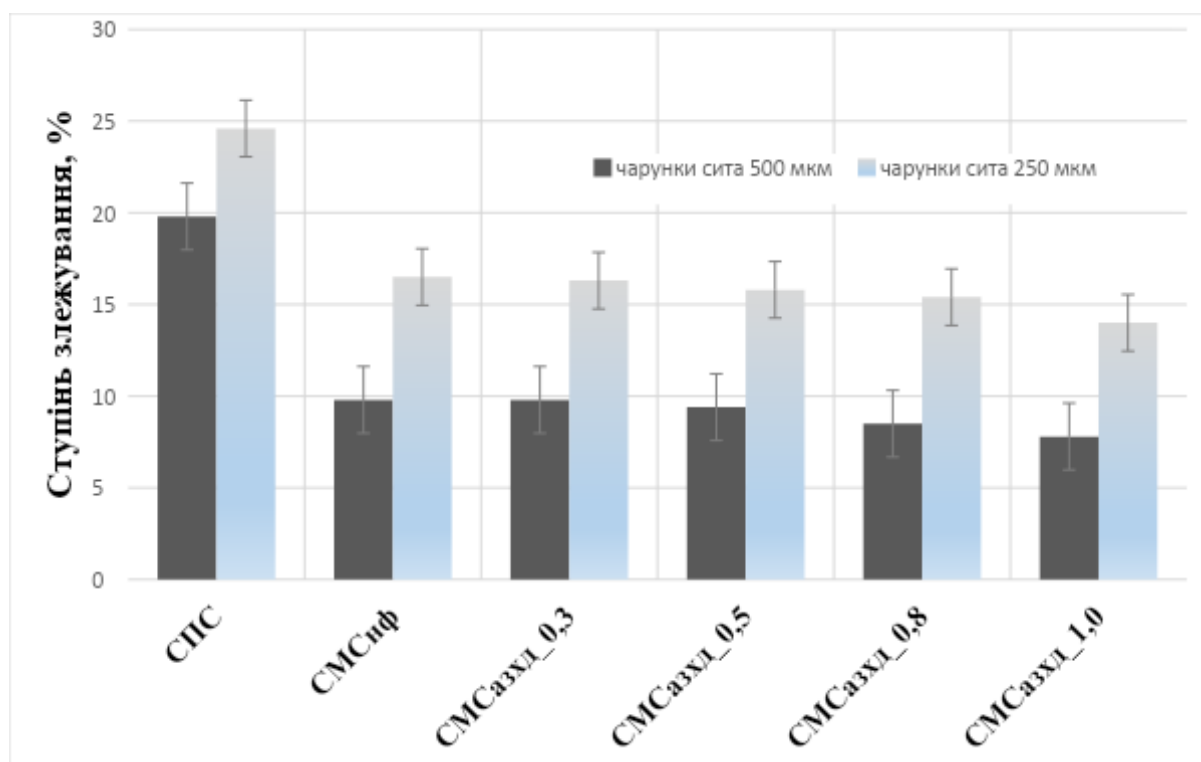
Крім того, існують дослідження щодо використання наночастинок як антизлежувальних агентів (Afzaal, M. et al., 2022), які не лише продовжують термін зберігання, а й покращують антимікробні властивості пакувальних матеріалів.

Відомо, що пірогенний кремнезем також містить частинки в нанорозмірному діапазоні (Тигон, 2020), що потенційно може надати йому додаткових функціонально-технологічних характеристик як антизлежувальної добавки.

Було проведено ряд досліджень з метою виявлення антизлежувальних властивостей пірогенного кремнезему.

Аналіз результатів дослідження моделювання прискореного злежування сухих молочних продуктів показав, що найбільш схильним до злежування є суха підсирна сироватка, у якої ступінь злежування (СЗ) досягав 24,6 %. У зразках сироватки демінералізованої сухої, знесоленої нанофільтрацією перед розпилювальним сушінням (СМС_{НФ}) цей показник становив близько 10 % при використанні сита з розміром чарунок 500 мкм та 16,5 % при розмірі 250 мкм. Це свідчить про їхню високу схильність до злежування, особливо за умов коливання параметрів зберігання.

Додавання пірогенного кремнезему у кількості 0,8–1,0 % від загальної маси СМС значно знижувало ризик злежування частинок. Зокрема, при введенні антизлежувальної харчової добавки (АЗХД) у концентрації 1,0 % ступінь злежування зменшувався до 7,8 % для сита з чарунками 500 мкм та до 14,0 % для сита з чарунками 250 мкм. Однак при використанні меншої кількості АЗХД (менше 0,8 % мас.) значного впливу на показники злежування порівняно з контрольними зразками СМС_{НФ} не спостерігалось (рис. 3.10).



**Рисунок 3.10 — Ступінь злежування експериментальних зразків
сухої молочної сироватки за наявності різних концентрацій
пірогенного кремнезему**

Згідно з Регламентом ЄС щодо харчових добавок, максимально допустима концентрація діоксиду кремнію (основного компонента пірогенного кремнезему) у харчових продуктах становить 10 000 мг/кг від загальної маси продукту. У зв'язку з цим вплив додавання АЗХД у кількості, що перевищує 1 %, не досліджувався.

Дослідження (Висоцький і Кочубей-Литвиненко, 2022; Kochubei-Lytvynenko et al., 2016) підтвердило відмінності між дослідним зразком СМС із додаванням АЗХД (СМС_{АЗХД}) та контрольними зразками за такими показниками, як температура склування (Tg) та активність води (табл. 1). Контрольний зразок СМС_{НФ} мав найнижчий показник температури склування. Додавання пірогенного кремнезему в концентрації 0,9±0,1 % призводило до підвищення цього показника на 10 °С. Результати зазначені у таблиці 3.11.

**Таблиця 3.11 – Температура склопереходу сироватки молочної
сухої (Kochubei-Lytvynenko et al., 2016)**

Дослідний зразок	Вологовміст, г/г сух.реч.	Активність води, відн.од.	Температура склування, Tg, °С
СМС _{НФ}	0,044±0,002	0,196±0,01	-3,0±0,2
СМС _{АЗХД}	0,034±0,001	0,187±0,01	+6,8±0,2

Отримані результати свідчать про те, що за встановлених в Україні режимів зберігання (від 0 до 20 °С) суха молочна сироватка з антизлежувальною добавкою (СМС_{АЗХД}) здебільшого перебуватиме в склоподібному стані, що забезпечує її високу стабільність під час зберігання.

Це підтверджено як розрахунком індексу чутливості до злежування та налипання (Schuck et al., 2005), так і експериментальними даними щодо ступеня злежування (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 – Оцінювання експлуатаційних властивостей сухої молочної сироватки під час фасування, транспортування та зберігання [T – Tg] і ΔСр

Дослідний зразок	ΔСр, Дж/(Г·К)	Характеристики налипання		Характеристики злежування		Ступінь злежування, % (експеримент)
		[T – Tg], °C	Індекс SCS (розрахунок)	[T–Tg], °C	Індекс SCS (розрахунок)	
СМС _{НФ}	0,38±0,01	33,0	8	23,0	7	10,0±0,5
СМС _{АЗХД}	0,32±0,01	23,2	7	13,2	5	7,8±0,2

Значення індексу SCS дозволяє прогнозувати поведінку сухого продукту під час сушіння, транспортування та зберігання. Найсприятливішими умовами вважається, коли $SCS \leq 4$, що вказує на відсутність липкості або злежування, тоді як значення $SCS \geq 6$ свідчить про високу або дуже високу адгезійну здатність та ризик злипання частинок (Schuck et al., 2005).

Для проведення розрахунків, спрямованих на прогнозування поведінки продукту під час фасування, транспортування та зберігання, було визначено такі температурні умови для сухої молочної сироватки (СМС): температура на виході із сушарки — +30 °C, температура зберігання — +20 °C.

Розрахункові дані підтвердили, що найбільшу схильність до злежування мав контрольний зразок СМС_{НФ}, для якого індекс SCS_{зл} становив 7, а адгезійні властивості досягали високого рівня (індекс SCS_{адг} = 8). Водночас додавання пірогенного кремнезему у кількості 0,9±0,1 % до загальної маси СМС_{НФ} сприяло зниженню ризику злежування (індекс SCS_{зл}

= 5) та незначному зменшенню адгезійної здатності (індекс $SCS_{адг} = 7$) (табл. 3.12, рис. 3.11).

Результати досліджень, а також розраховані на їх основі індекси SCS, повністю узгоджувалися з експериментальними спостереженнями за зразками під час зберігання при температурі $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$ і відносній вологості повітря не вище 80 %.

Важливим показником стабільності під час зберігання, що має значення для подальшої переробки сухої молочної сироватки, є визначення ознак неферментативного потемніння за показником білості. Втрата білості свідчить про активізацію реакції Майяра — взаємодії редукувальних цукрів з амінокислотами, яка, на відміну від інших біохімічних процесів, не сповільнюється навіть за низького вмісту вологи (Kilcast & Subramaniam, 2000).

Утворення меланоїдинів у сухому молочному продукті не лише спричиняє його потемніння, але й веде до появи неприємного специфічного присмаку та запаху, а також до зниження розчинності.

Результати проведених досліджень щодо ознак неферментативного потемніння в дослідних зразках $СМС_{АЗХД}$ у порівнянні з іншими зразками сухої молочної сироватки представлені у таблиці 3.13

Таблиця 3.13 – Визначення ознак неферментативного потемніння зразків сухої молочної сироватки під час зберігання в стандартних умовах.

Дослідний зразок	Білість СМС, відн.од., термін зберігання, місяців:					
	щойно виготовлена	1	6	8	12	18
СПС	85,3±3,0	85,3±3,0	75,1±3,0	72,8±3,0	69,0±3,0	57,0±3,0
СМС _{НФ}	90,6±2,0	90,6±2,0	83,6±2,0	80,1±2,0	79,0±2,0	72,0±2,0
СМС _{АЗХД_1,0}	90,4±1,0	90,4±1,0	89,7±2,0	87,1±2,0	84,3±2,0	80,0±1,0
СМС _{ЕД}	87,8±3,0	87,8±3,0	75,6±3,0	74,1±3,0	71,8±2,0	60,0±3,0

Додавання пірогенного кремнезему не мало значного впливу на показник білості сухої молочної сироватки. Протягом 18 місяців зберігання білість усіх дослідних зразків дещо знижувалася, проте в зразках СМС_{АЗХД} ця зміна була менш вираженою порівняно з іншими зразками сухої сироватки, виготовленими за різними технологіями, як із попереднім знесоленням перед сушінням, так і без нього.

Варто зазначити, що ознаки неферментативного потемніння в зразках СМС_{АЗХД} залишалися менш помітними навіть після 18 місяців зберігання в герметичному пакуванні при температурі (18 ± 2) °С та відносній вологості не більше 80 %. Показник білості становив 79,0–81,0 умовних одиниць.

Оскільки суха молочна сироватка часто використовується у відновленій формі, наприклад, у виробництві напоїв, важливо було оцінити вплив пірогенного кремнезему на її здатність до відновлення, зокрема, на розчинність.

Індекс розчинності дослідних зразків СМС_{АЗХД} у середньому відрізнявся від контрольних зразків (СМС_{НФ}) лише на $0,1 \pm 0,02$ %, що пов'язано з наявністю нерозчинних частинок пірогенного кремнезему. Ця різниця є незначною та не впливає на якість продукту, проте її слід враховувати при формуванні рекомендацій для промислового використання.

Дослідження завершеності процесу відновлення сухих молочних продуктів підтвердило відсутність негативного впливу пірогенного кремнезему на розчинність сухої сироватки. Випробування проводили за двома методами: традиційним розчиненням при температурі (40 ± 2) °С і прискореним методом – ультразвуковим кавітаційним обробленням за допомогою ультразвукового диспергатора Bandelin Sonopuls HD 2070.

Встановлено, що для обох методів розчинення, незалежно від наявності антизлежувальної добавки (АЗХД), стабілізація показника активності води досягалася практично одночасно. Однак при

ультразвуковій обробці спостерігалася незначна різниця у швидкості відновлення. Так, у разі традиційного методу повне розчинення СМС завершувалося через 80 ± 5 хв, тоді як при ультразвуковому впливі цей процес був інтенсифікований і завершувався через 15 ± 2 хв для контрольного зразка (СМС_{нф}) та через 10 ± 2 хв для СМС_{азхд}.

Це підтвердило відсутність негативного впливу пірогенного кремнезему на процеси розчинення сухої молочної сироватки. Більше того, завдяки своїм вологозв'язуючим властивостям, пірогенний кремнезем сприяв незначному прискоренню відновлення продукту під час ультразвукової обробки.

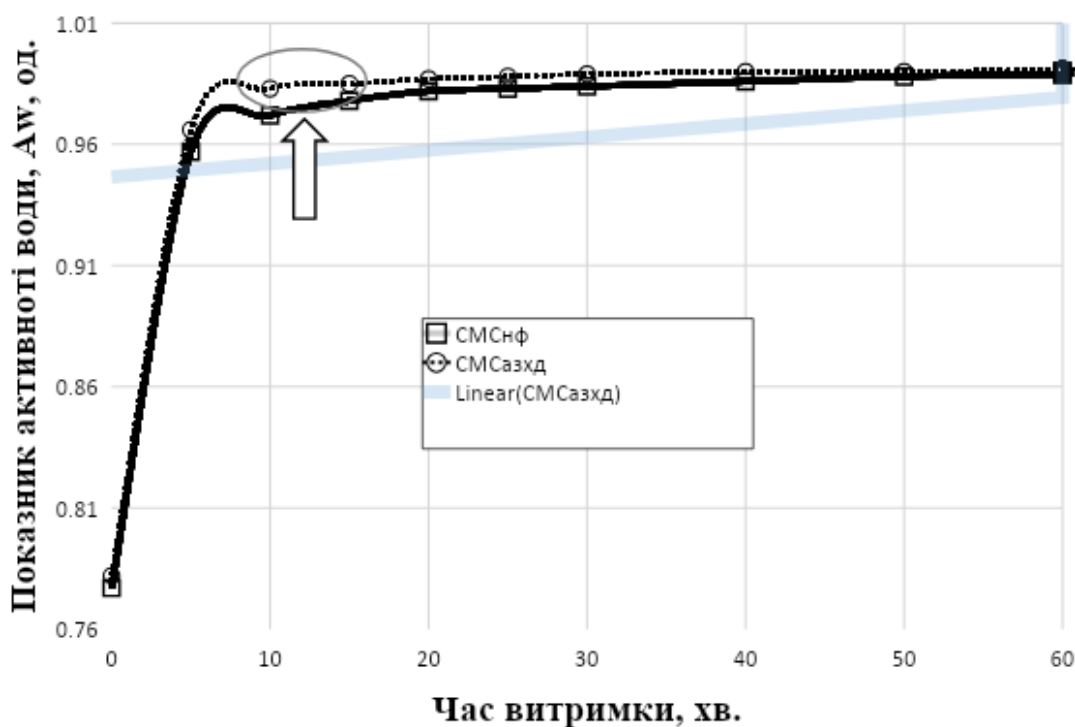


Рисунок 3.11 — Динаміка стабілізації показника активності води зразків СМС_{нф} та СМС_{азхд}, відновлених із використанням ультразвукового диспергатора

Проведені дослідження підтвердили доцільність використання пірогенного кремнезему вітчизняного виробництва марки «А-300» для покращення стабільності сухої молочної сироватки під час зберігання. Встановлено, що додавання $0,9 \pm 0,1$ % (мас.) пірогенного кремнезему

знижує ризик самоущільнення та злежування під час тривалого зберігання. Зокрема, результати ситового аналізу (500 мкм) показали, що ступінь злежування становив $8,1 \pm 0,2$ %, що дозволяє класифікувати продукт як такий, що не схильний до злежування.

Дослідження температури склування довели, що за встановлених в Україні режимів зберігання ($0-20$ °С, вологість ≤ 80 %) СМС_{АзХД} перебуває переважно у склоподібному стані, що сприяє його стабільності та запобігає структурним змінам під час тривалого зберігання. Крім того, результати розрахунку індексу чутливості до злежування та налипання (SCS), а також експериментальні дані підтвердили, що додавання $0,9 \pm 0,1$ % пірогенного кремнезему призводить до зниження ризику злежування (індекс SCS_{Зл} = 5) та незначного зменшення адгезійної здатності (індекс SCS_{Адг} = 7).

Окремо було досліджено вплив пірогенного кремнезему на розчинність сухої молочної сироватки. Результати аналізу підтвердили відсутність негативного впливу на розчинність, хоча через присутність нерозчинних частинок кремнезему спостерігалось незначне відхилення в межах $0,1 \pm 0,02$ %. Проте це не впливає на якість кінцевого продукту і може бути враховане у промислових рекомендаціях. Дослідження ознак неферментативного потемніння засвідчили, що навіть після 18 місяців зберігання у герметичному пакуванні при температурі (18 ± 2) °С та відносній вологості не більше 80 %, СМС_{АзХД} демонструвало мінімальні зміни білості (79,0–81,0 ум. од.), що підтверджує його стійкість до небажаних змін кольору та смакових характеристик.

З огляду на отримані результати, пірогенний кремнезем з питомою поверхнею 300 м²/г, ТМ “Орісіл”, може бути рекомендований як ефективна антизлежувальна добавка для сухої молочної сироватки. Практична значущість дослідження полягає у розробці доступного та ефективного способу покращення стабільності якісних показників сухої молочної

сироватки, що є важливим для її подальшого використання у харчовій промисловості та експортної логістики.

3.8 Наукове обґрунтування доцільності впровадження способу очищення білка при промисловому обробленні сироватки молочної для підприємств малої та середньої потужності.

Метою даного підрозділу є наукове обґрунтування впровадження способу очищення білка сироватки молочної пірогенним кремнеземом в промислових масштабах, розробки принципово технологічної схеми оброблення сироватки молочної пірогенним кремнеземом, а також створення апаратурно-технологічної схеми, яка може бути адаптована для застосування в умовах молокопереробних підприємств невеликої потужності.

В Україні значна частка молокопереробних підприємств припадає на малі та середні виробництва, загальна кількість яких перевищує 120 заводів. Основним спрямуванням таких підприємств є виробництво молочних продуктів (сир, кисломолочні напої, йогурти), побічним продуктом яких є молочна сироватка. Через відсутність ефективних технологічних рішень щодо її переробки більшість таких заводів не використовує сироватку, що призводить до її утилізації шляхом зливу у каналізаційні системи або водойми. Це не лише створює екологічне навантаження, а й спричиняє економічні втрати, оскільки сироватка містить цінні білкові та мінеральні компоненти.

За даними дослідження Pires et al. (2021), більшість малих і середніх підприємств молочної промисловості не мають достатнього технологічного оснащення для переробки сироватки, що змушує їх утилізувати побічні продукти виробництва або використовувати їх у якості корму для тварин. Водночас, дослідження Lavelli & Vercelli (2022) підтверджує, що ефективна переробка сироватки може сприяти економічному зростанню підприємств і впровадженню принципів циркулярної економіки.

Одним із перспективних методів ефективної обробки молочної сироватки є застосування пірогенного кремнезему (ПК), який здатний зв'язувати білкові фракції та очищувати сироватку від домішок. Дослідження, проведені у попередніх підрозділах, підтвердили ефективність адсорбції білкових сполук пірогенним кремнеземом, що відкриває можливості для створення технологічної схеми його впровадження на підприємствах малої та середньої потужності.

Дослідження Meneses & Flores (2016) також показало, що використання інноваційних підходів до обробки сироватки сприяє зменшенню виробничих витрат та покращенню екологічної ситуації. Це підтверджує необхідність розробки доступних технологічних рішень для очищення білка із сироватки, які можуть бути ефективно впроваджені у виробничі процеси молочних заводів із невеликими потужностями.

Принципова технологічна схема очищення білка із сироватки молочної за допомогою пірогенного кремнезему складається з декількох основних етапів, які забезпечують ефективне видалення білкових фракцій та їх подальше використання у харчовій або кормовій промисловості. Вихідним продуктом є молочна сироватка, що утворюється в процесі виробництва сиру або інших молочних продуктів (рисунок 3.12).

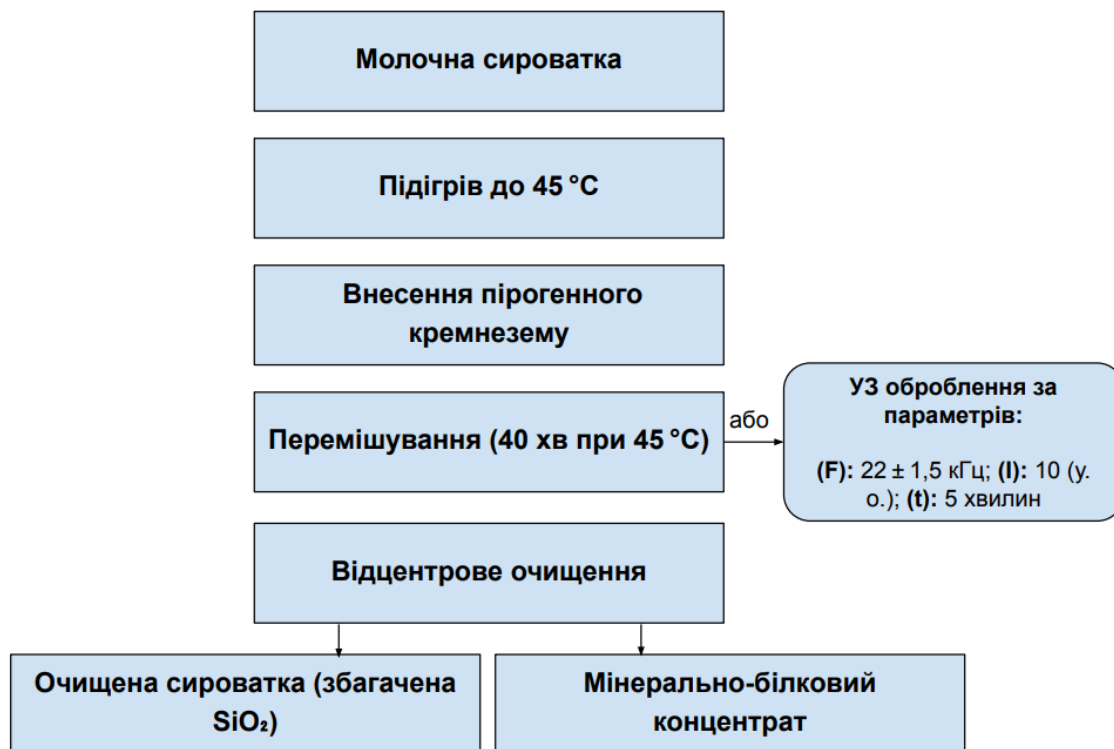


Рисунок 3.12 — Принципова технологічна схема способу очищення сироватки молочної від білка за рахунок використання пірогенного кремнезема

Першим технологічним етапом є підігрів сироватки до температури 45°C, що сприяє покращенню процесу адсорбції білкових фракцій на пірогенному кремнеземі. Дотримання оптимального температурного режиму має важливе значення для ефективності сорбційного процесу, оскільки підвищує взаємодію білків із сорбентом та сприяє їх рівномірному розподілу у розчині.

На наступному етапі до підігрітої сироватки додається пірогенний кремнезем у кількості 1,5 % від маси рідкої фази. Кремнезем рівномірно розподіляється у всьому об'ємі за рахунок інтенсивного перемішування, що дозволяє забезпечити максимальний контакт білків із сорбентом. Адсорбція триває протягом 40 хвилин при сталій температурі 45°C, що є необхідною умовою для ефективного зв'язування білкових молекул із поверхнею кремнезему. Під час цього процесу важливо підтримувати рівномірне

перемішування, оскільки це запобігає утворенню нерівномірних агрегатів та сприяє максимальному вилученню білкових компонентів.

Після завершення сорбційного процесу суміш піддається відцентровому очищенню або фільтрації. На цьому етапі відбувається розділення обробленої сироватки на дві фракції. Перша фракція – це очищена сироватка, яка містить залишки пірогенного кремнезему (SiO_2) і може бути використана у подальших технологічних процесах або перероблена у нові продукти. Друга фракція – це мінерально-білковий концентрат, який включає основні білкові компоненти, що були адсорбовані на кремнеземі.

Отримана в результаті очищення молочна сироватка, збагачена кремнієм, та мінерально-білковий концентрат (МБК) мають перспективу подальшого широкого застосування. Завдяки специфічним фізико-хімічним властивостям ці продукти можуть бути використані у різних галузях харчової промисловості та альтернативних напрямках переробки.

У випадку, якщо мінерально-білковий концентрат містить радіоактивний цезій, його необхідно утилізувати відповідно до чинних нормативних документів щодо поводження з радіоактивними відходами. Якщо ж у складі продукту не виявлено небезпечних домішок, МБК може використовуватися для різних цілей, що зображено на блок-схемі нижче (рисунок 3.13).

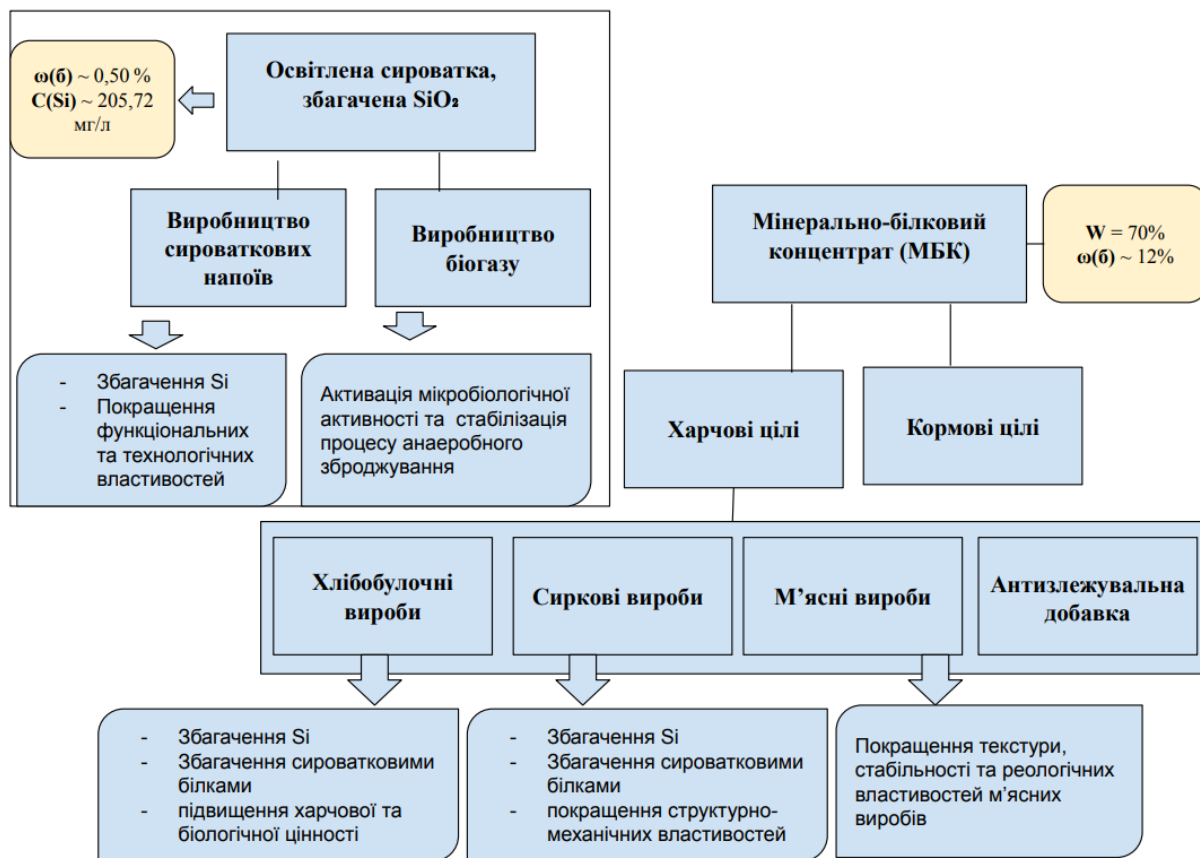


Рисунок 3.13 — Шляхи потенційного застосування очищеної сироватки молочної та мінерально-білкового концентрату, одержаних після адсорбційного очищення пірогенним кремнеземом

Оброблена сироватка, збагачена SiO_2 , може бути використана у двох основних напрямках. Перший напрям – виробництво сироваткових напоїв. Зменшення вмісту білків у обробленій сироватці сприяє покращенню технологічного процесу її подальшої переробки, зокрема під час термічної обробки. Завдяки цьому знижується ризик утворення білкових відкладень та нагару на нагрівальних елементах обладнання, що забезпечує стабільність виробничого процесу. Крім того, збагачення обробленої сироватки молочної кремнієм та збереження мінеральних компонентів у сироватці дозволяє використовувати її для створення функціональних напоїв, спортивного харчування та спеціалізованих дієтичних продуктів, забезпечуючи високу харчову цінність кінцевих виробів.

Другий напрям – використання обробленої сироватки у виробництві біогазу. Дослідження показали, що молочна сироватка є ефективним субстратом для процесів анаеробного бродіння, що дозволяє отримувати біогаз, який після стадії додаткового очищення перетворюють на біометан та використовують в якості альтернативного джерела енергії, зменшуючи екологічне навантаження на довкілля (Висоцький & Кочубей-Литвиненко, 2024).

МБК може застосовуватися у трьох основних напрямках. Перший – збагачення сиркових виробів, де білкові фракції сприяють підвищенню харчової цінності кінцевого продукту. Другий – використання у виробництві м'ясних виробів, що дозволяє покращити структурні характеристики продуктів, збільшити вміст білка та покращити споживчі властивості. Використання пірогенного кремнезему у технології м'ясомістких продуктів оздоровчого спрямування вже підтверджено рядом досліджень, що вказують на його функціональність та безпеку (Пасічний & Гердчук, 2015). Третій напрям – використання у хлібопекарській галузі. Дослідження показують, що діоксид кремнію може позитивно впливати на структурно-механічні властивості тіста, зокрема покращувати якість борошняних виробів та їхню стійкість до небажаного злежування (Vermeiren et al., 1999).

Крім того, антизлежувальні властивості МБК дозволяють використовувати його як технологічну добавку для запобігання злежуванню порошкових продуктів, таких як борошно, цукрова пудра та інші сипкі інгредієнти. Ця функція була підтверджена у попередніх розділах дослідження.

Ще одним напрямом використання мінерально-білкового концентрату є кормова промисловість. Завдяки високому вмісту амінокислот та оптимальному білковому складу, МБК може бути використаний для збагачення кормів для сільськогосподарських тварин, що

сприяє підвищенню їхньої продуктивності та покращенню засвоюваності кормових сумішей.

Таким чином, впровадження технології очищення білка із молочної сироватки дозволяє не лише мінімізувати втрати цінних компонентів, а й створити можливості для формування нових харчових та кормових продуктів. Різноманіття можливих шляхів використання обробленої сироватки та мінерально-білкового концентрату сприяє економічній ефективності молокопереробних підприємств, зменшенню екологічного навантаження та розвитку екологічно безпечних виробничих практик.

Логічним продовженням цього блоку буде перехід до технічної реалізації процесу очищення молочної сироватки за допомогою пірогенного кремнезему. У попередніх розділах було доведено ефективність запропонованого підходу, визначено оптимальні технологічні параметри та обґрунтовано перспективи використання отриманих продуктів. Наступним етапом є розробка апаратурно-технологічної схеми, яка дозволить забезпечити стабільність та ефективність виробничого процесу в умовах молокопереробних підприємств малої та середньої потужності.

Апаратурно-технологічна схема відображає основні етапи оброблення молочної сироватки пірогенним кремнеземом, починаючи від підготовки сировини та внесення адсорбенту, і завершуючи отриманням очищеної сироватки та мінерально-білкового концентрату. Для її розробки враховано особливості роботи обладнання, необхідність забезпечення рівномірного змішування компонентів, контроль температурного режиму та ефективність процесу розділення фаз (рисунок 3.14).

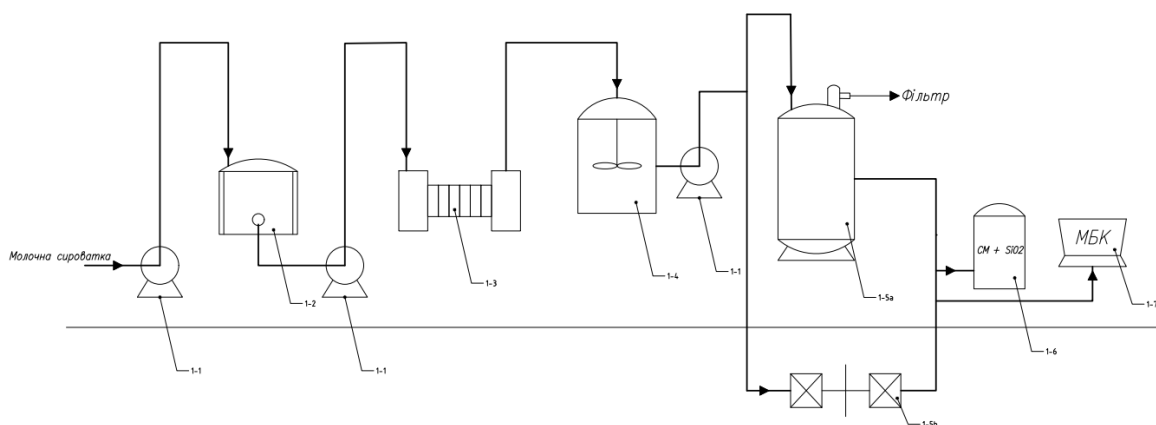


Рисунок 3.14 — Апаратурно-технологічна схема очищення білка сироватки молочної за допомогою пірогенного кремнезему

Умовні позначення: 1-1– Насос подачі , 1-2 – Резервуар для молочної сироватки, 1-3 – Теплообмінник, 1-4 – Проміжна секція з лопатевими мішалками, 1-5а – Фільтр 1 ОСП-30, 1-5b – Центрифуга, 1-6 – Резервуар очищеної сироватки, 1-7 – Резервуар фільтрату.

Апаратурно-технологічна схема очищення білка сироватки молочної за допомогою пірогенного кремнезему складається з низки послідовних етапів, кожен із яких відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності процесу. Перед початком технологічного процесу молочна сироватка накопичується у спеціальному резервуарі, що дозволяє стабілізувати виробничий цикл та забезпечити рівномірне надходження сировини на наступні етапи. У резервуарі підтримується оптимальна температура для запобігання небажаним змінам складу сироватки до її подальшої обробки.

З метою забезпечення безперервного потоку рідини у технологічному процесі сироватка перекачується насосом подачі, який дозволяє регулювати швидкість подачі та створювати оптимальні умови для подальших етапів обробки. Після цього вона проходить через теплообмінник, де здійснюється її підігрів до температури 45°C. Підвищення температури сприяє зниженню в'язкості сироватки та покращує розподіл молочних білків у системі, що дозволяє ефективніше реалізовувати процес адсорбції. Крім того,

контрольований режим нагрівання запобігає утворенню білкових відкладень та нагару, що покращує експлуатаційні характеристики технологічного обладнання.

Після підігріву сироватка надходить у проміжну секцію з лопатевими мішалками, де здійснюється внесення пірогенного кремнезему у кількості 1,5 % від об'єму сироватки. Для забезпечення рівномірного контакту адсорбенту із рідиною застосовується інтенсивне перемішування протягом 40 хвилин, що дозволяє максимально ефективно зв'язати небажані білкові фракції та інші домішки із частинками пірогенного кремнезему. Після завершення процесу адсорбції суміш подається насосом перекачки на розділення.

Розділення здійснюється одним із двох можливих способів: фільтрацією або центрифугуванням. У разі використання фільтра ОСП–30 механічне видалення адсорбенту та небажаних домішок відбувається через систему мікросітчастих фільтрів, що забезпечує стабільність поділу без необхідності додаткового обладнання для інтенсивного відцентрового поділу. Такий метод доцільно використовувати на виробництвах із середньою продуктивністю, де важлива стабільність та надійність розділення. Водночас у випадку використання центрифуги поділ відбувається за рахунок відцентрових сил, що дозволяє швидше та ефективніше відокремити адсорбент від рідини. Центрифугування є оптимальним для підприємств, які обробляють великі обсяги сировини, а також коли необхідно забезпечити максимальну чистоту кінцевого продукту.

Після завершення процесу очищення сироватка надходить у резервуар, де накопичується перед подальшим використанням. Незначна частка пірогенного кремнезему залишається у рідині, що сприяє її збагаченню кремнієм, а сам продукт може бути використаний у виробництві функціональних напоїв, біогазу або інших видів продукції.

Водночас фільтрат, що містить відокремлений пірогенний кремнезем, накопичується у резервуарі для подальшої утилізації або можливого використання в інших технологічних процесах за умови відповідності нормативним вимогам.

Розроблена апаратурно-технологічна схема дозволяє оптимізувати виробничий процес для підприємств малої та середньої потужності. Використання підігріву та контрольованого внесення адсорбенту забезпечує високу ефективність очищення молочної сироватки, тоді як можливість вибору способу розділення дозволяє адаптувати систему під конкретні виробничі вимоги. Такий підхід дозволяє мінімізувати технологічні втрати, підвищити якість кінцевого продукту та знизити екологічне навантаження на підприємства, які впроваджують цю технологію. Технологія адсорбції сироватки молочної пірогенним кремнеземом була апробована на ТОВ «Галіївський маслозавод» (Додаток А).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ III

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений науковому обґрунтуванню застосування наночастинок пірогенного кремнезему в молочній промисловості. Проведені дослідження підтвердили високу ефективність цього матеріалу як адсорбента білкових сполук, стабілізатора сухих молочних продуктів і засобу для зниження радіоактивного забруднення молочної сироватки.

Встановлено, що гідрофільний пірогенний кремнезем з питомою поверхнею 300 м²/г є найбільш ефективним адсорбентом для видалення білків із сироватки молочної. Збільшення його концентрації до 1,5–2,0 % сприяє максимальному зниженню вмісту білка в рідкій фазі до 55,45 %.

Методом електрофоретичного аналізу встановлено, що білки з молекулярною масою 55–80 кДа мають найбільшу спорідненість до

адсорбенту, що свідчить про вибірковість пірогенного кремнезему відносно певних білкових фракцій.

Додавання 0,8–1,0 % пірогенного кремнезему до сухої молочної сироватки значно зменшує ступінь злежування, що підтверджено експериментально. Температура склування зразків із добавкою пірогенного кремнезему підвищується на 10 °С, що покращує їхню стабільність під час зберігання.

Обробка молочної сироватки пірогенним кремнеземом сприяє її збагаченню кремнієм, концентрація якого збільшується у 97 разів порівняно з контрольним зразком. Це відкриває можливості використання такої сироватки у виробництві функціональних напоїв.

Дослідження показали, що застосування пірогенного кремнезему дозволяє знизити вміст ^{137}Cs у молочній сироватці на 17–44 %, що підтверджує його ефективність як засобу очищення продуктів харчування від радіоактивного забруднення.

Запропоновано принципову технологічну схему очищення білка із сироватки молочної за допомогою пірогенного кремнезему. Впровадження цієї технології на підприємствах малої та середньої потужності дозволить зменшити екологічне навантаження, підвищити економічну ефективність виробництва та розширити асортимент продуктів.

Визначено необхідність подальшого вивчення впливу модифікованих варіантів пірогенного кремнезему на молочну сироватку, дослідження його взаємодії з іншими компонентами харчових продуктів та оптимізації технологічних параметрів його застосування.

Отримані результати свідчать про доцільність і перспективність використання пірогенного кремнезему в молочній промисловості, що дозволяє значно покращити якість та стабільність молочної сироватки, підвищити її харчову цінність та забезпечити ефективне очищення від шкідливих домішок, зменшити злежування сухих молочних продуктів.

РОЗДІЛ IV. НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ЦИНКУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ФЕРМЕНТУВАННЯ СИРОВАТКИ МОЛОЧНОЇ

Метою даного розділу є встановлення доцільності застосування наночастинок оксиду цинку, отриманих шляхом електроіскрового диспергування струмопровідних металевих гранул, для інтенсифікації виробництва ферментованої сироватки молочної кислоти, та подальшого її використання як коагулянта для виготовлення м'якого термокислотного сиру та як харчовий інгредієнт у житньо-пшеничних виробках.

4.1 Аналіз перспективних шляхів інтенсифікації ферментування сироватки молочної кислоти

Зважаючи на економічні та екологічні фактори, що стимулюють розширення промислового використання кислоти сироватки у харчовому виробництві, перспективним напрямом є її ферментування до рівня титрованої кислотності 150...170°Т. Така модифікована сироватка може бути використана як природний коагулянт у виробництві м'яких сирів термокислотного зсідання, а також як натуральний підкислювач для тіста житньо-пшеничних хлібобулочних виробів. Обґрунтованість цього підходу підтверджується статистичними даними Державної служби статистики України (2024), які фіксують стійке зростання обсягів виробництва зазначених видів продукції.

Водночас традиційний процес ферментування кислоти сироватки потребує значного часу та виробничих ресурсів. Зокрема, тривалість технологічного циклу може сягати 48 годин, що зумовлює підвищення виробничих витрат, необхідність виділення додаткових площ для зберігання сировини та загальне збільшення собівартості кінцевого продукту. Таким чином, оптимізація технології ферментування є важливим завданням для покращення економічних показників виробництва та підвищення ефективності використання сироватки молочної кислоти.

Наявні технологічні підходи до прискорення ферментаційних процесів здебільшого обмежуються застосуванням органічних кислот, харчових добавок або спеціалізованих заквасок. Однак такі методи мають низку обмежень, зокрема вплив на органолептичні характеристики кінцевого продукту та потребу у додаткових витратах на закупівлю органічних кислот або інноваційних стартових культур, які володіють гарною кислотоутворюючою здатністю.

Альтернативним та перспективним методом є створення оптимального середовища для розвитку молочнокислих бактерій під час ферментування сироватки. Це може бути досягнуто шляхом збагачення сироватки молочної біологічно цінними мінеральними елементами, які виступають поживним середовищем для мікроорганізмів. Такий підхід сприяє стимуляції росту мікроорганізмів, що, у свою чергу, прискорює кислотоутворення та підвищує мікробіологічну стабільність продукту.

Окрім скорочення часу ферментування, вдосконалена технологія дозволяє підвищити харчову та біологічну цінність сироватки завдяки насиченню її мінеральними елементами, що можуть мати додаткову функціональну значущість у харчових продуктах. Таким чином, отримана ферментована сироватка може використовуватися не лише як компонент для сирів та хлібобулочних виробів, а й як інгредієнт у розробці функціональних продуктів із підвищеним вмістом есенціальних мікроелементів.

Мікроорганізми потребують значної кількості макро- та мікроелементів, зокрема карбону, нітрогену, кисню, водню, фосфору, сульфуру, калію, кальцію, магнію, цинку, мангану, натрію, хлору, молібдену, силіцію та інших компонентів (Пирог, 2010). Доведено, що мікроелементи, такі як Zn, можуть відігравати роль стимуляторів ферментаційних процесів, оскільки вони входять до складу клітинних структур, сприяють енергетичному обміну, синтезу білка та активують

ферментативні реакції (Stehlik-Tomas et al., 2004). Крім того, вони позитивно впливають на бродильну активність дріжджів (Карпутіна, Романова, Сидор & Карпутіна, 2012).

Дослідження підтвердили, що металовмісні частинки металів, таких як магній та манган, особливо у нанорозмірному стані, мають позитивний вплив на ферментацію сироватки молочної (Kochubei-Lytvynenko, Chernyushok, Bilyk & Bondarenko, 2019), забезпечуючи прискорення цього процесу за рахунок стимулювання молочнокислих бактерій.

Разом з тим, встановлено, що додавання цинковмісних компонентів покращує фізіологічний стан та біологічну активність *Lactobacillus plantarum* DNZ-4, що супроводжується підвищенням антиоксидантних властивостей, а також здатністю бактерій поглинати вільні радикали (Meng et al., 2022).

Окрім того, виявлено, що електронноіонне оброблення під час завантаження дріжджів у бродильні апарати сприяє зменшенню кількості нежиттєздатних клітин на 26–40 % та прискоренню бродіння в середньому на 2 доби (Карпутіна et al., 2012). Подібний ефект продемонстровано у дослідженнях з використання наноаквахелату цинку, отриманого електроіскровим методом: при додаванні Zn 0,10 мг/дм³ інтенсивність виділення CO₂ на завершальних етапах бродіння зростала на 14 %, а процес зброджування скорочувався на 1–2 доби залежно від початкової концентрації екстракту у суслі (Кошова, Яжло, Каплуненко & Огородник, 2015).

Цинк, окрім впливу на життєдіяльність мікроорганізмів, є одним із найбільш важливих мікроелементів для людини. Він виконує три ключові біологічні функції: каталітичну, структурну та регуляторну (Chasapis et al., 2012). Як незамінний мікроелемент, він бере участь у процесах генетичної експресії, синтезу нуклеїнових кислот, клітинного росту та диференціації. Цинк також входить до складу понад 200 ферментних систем, які

контролюють основні метаболічні процеси в організмі людини. Його дефіцит може суттєво впливати на функціонування імунної системи, що особливо актуально в умовах сучасних викликів, пов'язаних із вірусними інфекціями (Чекман, Ульберг, Руденко та ін., 2013).

Молочна сироватка природно містить комплекс макро- та мікроелементів (González-Weller et al., 2023), проте концентрація Zn у ній є недостатньою для забезпечення оптимальної життєдіяльності молочнокислих бактерій. Зважаючи на це, перспективним рішенням є збагачення сироватки молочної сполуками цинку, що дозволить інтенсифікувати процес ферментування, підвищити технологічну ефективність використання сироватки у виробництві ферментованих продуктів та збільшити її харчову цінність.

З розвитком нанотехнологій значна увага приділяється використанню цинковмісних сполук у нанорозмірному стані. Зокрема, наночастинки оксиду цинку (нано-ZnO) дедалі ширше застосовуються у харчовій промисловості, медицині, фармакології, сільському господарстві та виробництві засобів особистої гігієни (Чекман et al., 2013). Враховуючи підтверджений стимулюючий вплив цинку на мікроорганізми, його використання для збагачення ферментованої сироватки молочної є перспективним напрямом, що відкриває можливості для підвищення якості, стабільності та функціональності кінцевого продукту.

4.2 Визначення функціонально-технологічних властивостей частинок оксиду цинку, отриманих електроіскровим диспергуванням гранул металу, як збагачуючого інгредієнту для сироватки молочної

З огляду на проведений у підрозділі 4.1. аналітичний огляд проблематики інтенсифікації ферментування сироватки молочної актуальним є підбір цинковмісних препаратів, що містять частинки в нанорозмірному діапазоні, для її збагачення перед сквашуванням з метою збільшення поживних для мікроорганізмів мікроелементів.

Як відомо з літературних джерел за тематикою використання наноматеріалів і нанотехнологій в ветеринарії, медицині, харчових технологіях (Нанотехнології у фармації та медицині, 2018), біодоступність, в тому числі для мікроорганізмів, та технологічна ефективність мінеральних елементів, певною мірою залежать від розміру отриманих частинок, при цьому домінування нанорозмірної фракції сприяє посиленню їх біологічної ефективності.

Враховуючи вищезазначене в якості об'єкта на цьому етапі дослідження було обрано наночастинки оксиду цинку (ZnO), отримані методом електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідкому середовищі. Вибір саме цього способу обумовлений його рядом переваг, що є критично важливими для застосування в харчових технологіях. Зокрема, електроіскрове диспергування дозволяє отримувати наночастинки без використання додаткових хімічних реагентів, що виключає ризик сторонніх забруднень та дозволяє забезпечити відповідність санітарно-гігієнічним вимогам до харчових інгредієнтів.

Крім того, даний електрофізичний спосіб забезпечує отримання частинок, відносно контрольованого розміру, що сприяє високій біологічній доступності та функціональній активності наночастинок у харчових системах (Лопатько, 2015). Важливою перевагою є також висока хімічна чистота отриманого продукту, оскільки процес не потребує застосування стабілізаторів або поверхнево-активних речовин. Це дозволяє мінімізувати ризик небажаних побічних реакцій та забезпечити стабільність кінцевого колоїдного розчину.

Окрім технологічних характеристик, електроіскровий метод відрізняється відносною простотою реалізації та екологічністю, що робить його придатним для впровадження у промислові процеси без суттєвих змін у виробничій інфраструктурі (Кочубей-Литвиненко, 2021; Лопатько, 2015).

Таким чином, використання електроіскрового диспергування для отримання наночастинок оксиду цинку дозволяє створити стабільний і харчово-безпечний збагачуючий інгредієнт (це твердження доведено власними дослідженнями, описаними в підрозд. 4.5), оптимальний для подальшого застосування у технологіях ферментування молочної сироватки.

На першому етапі дослідження було проведено аналіз дисперсних характеристик частинок оксиду цинку, отриманих електроіскровим диспергуванням в електророзрядній камері експериментального технологічного комплексу, розробленого науковцями НУБіП України (див. розділ 2).

Оброблення здійснювали за параметрів і режимів, що були встановлені і обґрунтовані науковцями НУБіП України і НУХТ як найраціональніші для отримання частинок металів з домінуванням нано- і ультрадисперсних фракцій (Жильцов, Коробський, Лапшин та Олішевський, 2017; Кочубей-Литвиненко, 2021; Лопатько, Афтандіянц, Зазимко та Трач, 2016). А саме: напруга зарядки конденсатора - 80...100 В, ємність конденсатора - 100 мкФ, індуктивність розрядного контуру - близько 1 мкГ, частота імпульсів - 0,2...2,0 кГц, тривалість імпульсу - 200 мкс, проміжок між гранулами металів - до 0,1, об'єм електророзрядної камери 300...1000 см³, експозиція – 30...120 с, температура середовища, що обробляється - (20 ± 2) °С.

Слід зауважити, що для об'єктивного оцінювання розмірності одержаних внаслідок електроіскрового диспергування, дослідження дисперсності було вирішено проводити не на сироватці молочної, що є полідисперсною системою, розміри частинок якої коливаються в широкому діапазоні від 5...15 нм до 2000 мкм, а на дейонізованій воді. Вибір на користь деіонізованої води був зумовлений її низькою електропровідністю (не більше ніж 0,003 мС/см), що, в свою чергу, є запорукою створення

найкращих умов для реалізації електроіскрового диспергування гранул металів (Лопатько, Афтанділянц, Зазимко та Трач, 2016).

В результаті дисперсійного аналізу частинок, проведеного на аналізаторі Malvern Zetasizer Nano ZS, встановлено, що колоїдний розчин, отриманий диспергуванням струмопровідних гранул металів у водному середовищі протягом 30...60 с містив нано- та ультрадисперсні частинки в розмірному діапазоні від 40 до 300 нм. Середній розмір частинок цинку складав $101,3 \pm 5,0$ нм (рис.4.1). Дисперсні та фізичні характеристики отриманого колоїдного розчину цинку наведено на рис. 4.1.

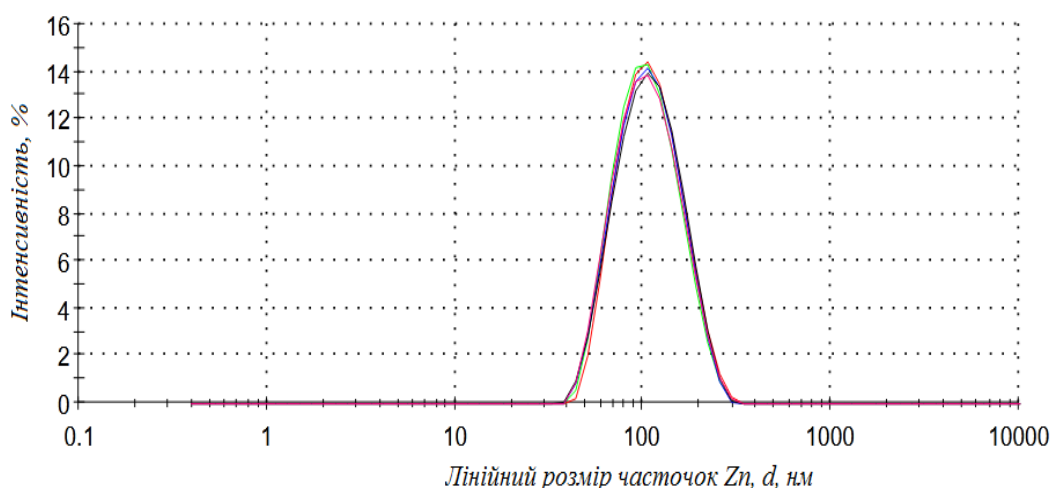


Рисунок 4.1 – Криві розподілу лінійних розмірів частинок ZnO

Було встановлено, що близько 50 % частинок ZnO знаходяться саме в нанорозмірному діапазоні, що забезпечує високу біологічну доступність та підвищену функціонально-технологічну ефективність цього мінерального елемента у харчових системах.

Таблиця 4.1 – Дисперсні та фізичні характеристики колоїдного розчину цинку, одержаного електроіскровим диспергуванням з часом експозиції 30...60 с

Параметр	Одиниця вимірювання	Числове значення параметра

Концентрація цинку у колоїдному розчині	мг/см ³	0,056±0,003
Середній гідродинамічний розмір частинок	нм	101,3±5,0
Індекс полідисперсності	ум.од.	0,101
ζ-потенціал	мВ	-(15,4±0,7)
Електропровідність колоїдного розчину	мС/см	0,101±0,005

Визначені показники ζ-потенціалу одержаного колоїдного розчину цинку та індексу полідисперсності вказують на високу седиментаційну стабільність отриманої дисперсної системи.

Під час дослідження статистичного розподілу розмірів частинок колоїдних розчинів цинку, що отримали за різного часу електроіскрового диспергування (від 30 до 120 с), встановлено, що зі збільшенням часу оброблення зразків до 90...120 с спостерігалось зростання частки мікрофракції цинковмісних частинок у колоїдному розчині.

На наступному етапі за допомогою скануючої електронної мікроскопії, проведеної на приладі Tescan Mira 3 LMU, вивчали морфологію цинковмісних частинок, отриманих електроіскровим диспергуванням струмопровідних гранул цинку в середовищі деіонізованої води (рис. 4.2).

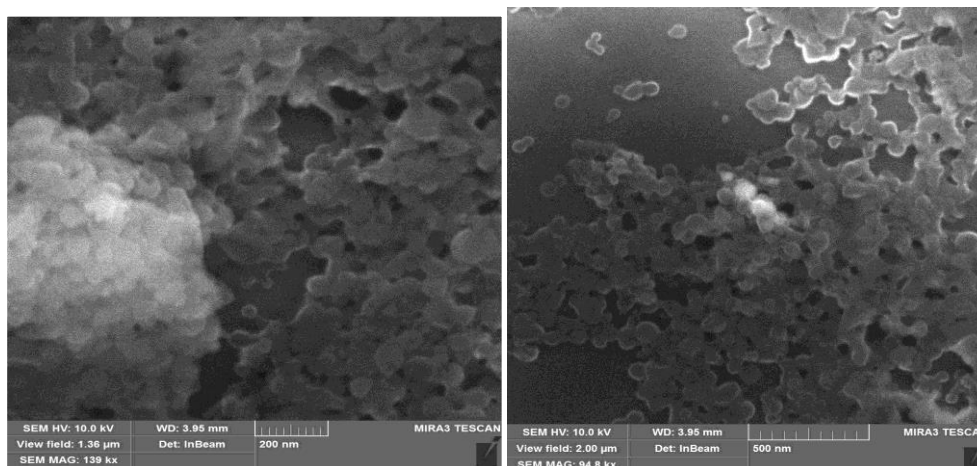
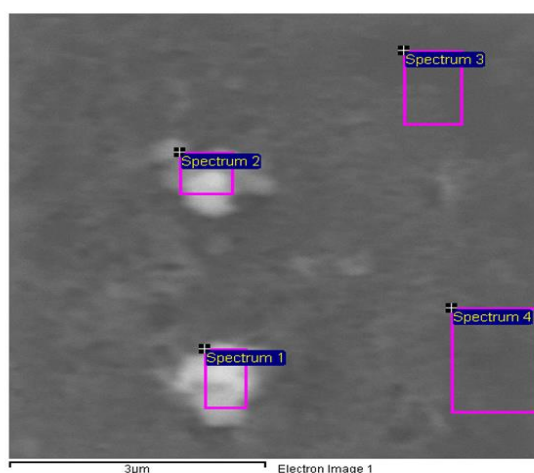


Рисунок 4.2 – Результати електронно-мікроскопічного дослідження колоїдного розчину цинку (мікрофотозображення отримано у режимі InBeam-детектора)

За допомогою програмного забезпечення приладу Tescan Mira 3 LMU для оброблення отриманих зображень скануючої електронної мікроскопії (SEM) з енергодисперсійною спектроскопією (EDX), було встановлено кількісний вміст цинку і кисню у масових відсотках на обраних мікроділянках. Для аналізу взято спектри 1-2, а спектри 3-4 були відкинуті, як незначущі. (див. рис. 4.3).



*Елементний
ваговий склад частинок:*

Zn = 14,4 %
O = 30,7 %

Рисунок 4.3 – SEM-зображення та результати EDX-аналізу елементного складу цинковмісних частинок

Проведена ідентифікація елементного складу цинковмісних частинок, а саме встановлене співвідношення металу і кисню у перерахунку на елементний склад, дозволяє зробити припущення щодо формування внаслідок електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металу у середовищі деіонізованої води оксидних фаз цинку. При цьому, як видно із результатів елементного вагового складу, наявний кисень лише частково можна віднести до оксидної фази відповідно до стехіометричного складу цинку і кисню у оксидній фазі ZnO. Надлишковий кисень, який не відповідає стехіометричному складу ZnO, ймовірно, розчиняється у кристалічній гратці поверхні частинок. На користь цього припущення свідчать дослідження електроіскрового процесу диспергування таких металів, як срібло, магній, манган та ін., проведенні іншими науковцями (Лопатько, Афтанділянц, Зазимко та Трач, 2016; Кочубей-Литвиненко, 2021).

Подальші дослідження щодо збагачення системи частинками цинку проводили на сироватці молочній.

Результати досліджень електроіскрового оброблення сироватки молочної, висвітлені в роботі (Кочубей-Литвиненко, 2021), підтвердили вплив електропровідності середовища на інтенсивність електроіскрових розрядів і характер перебігу електроіскрового диспергування гранул металів. Тому враховуючи, що різні види сироватки хоч і не значно, але різняться за електропровідністю, було вирішено дослідити ступінь електроіскрового збагачення цинком двох традиційних видів сироватки молочної - з-під сиру кисломолочного і підсирної. Початкова електропровідність першого виду становила 6,0...6,4 мСм/см, а іншого - 5,5...5,9 мСм/см.

Дослідження вмісту цинку у молочній сироватці після електроіскрового оброблення в електророзрядному комплексі зі струмопровідними гранулами цинку протягом 30...120 с продемонструвало

збільшення концентрації Zn в середньому в 1,3...3,0 рази залежно від тривалості оброблення та виду сироватки (рис. 4.4).

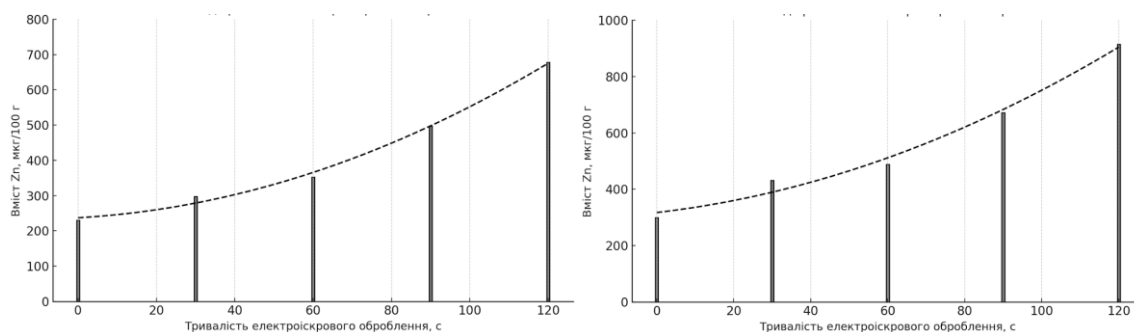


Рисунок 4.4 - Вміст цинку у сироватці з-під сиру кисломолочного (а) та підсирній (б) до та після електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металу

Слід зауважити, що вид сироватки (з-під сиру кисломолочного, підсирна) не справляв суттєвого впливу на ступінь збагачення цінним мінеральним елементом. В той же час тенденція до зростання ступеня збагачення сироватки молочної цинком із зростанням часу електроіскрового оброблення мала подібний характер як для сироватки з-під сиру кисломолочного, так й для підсирної.

Крім того, встановлено, що насичення сироватки цинковмісними частинками призводить до підвищення рН у бік слабколужного середовища, причому залежність рівня рН є прямопропорційною до часу електроіскрового оброблення (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Фізико-хімічні показники сироватки молочної до та після електроіскрового оброблення

Вид сироватки молочної	Час електроіскрового оброблення, с	рН (одиниці рН)	Електро-провідність, мСм/см	Окисно-відновний потенціал, мВ
підсирна	-	6,15±0,20	5,70±0,20	15±0,5
	30	6,30±0,20	5,77±0,20	55±3,0

	60	6,55±0,20	5,95±0,20	94±4,0
	90	6,78±0,30	6,12±0,20	125±4,5
	120	6,95±0,35	6,33±0,30	168±6,0
з-під сиру кисломолочно го	-	4,30±0,20	6,2±0,20	12±0,5
	30	4,50±0,20	6,35±0,25	48±2,0
	60	4,85±0,20	6,50±0,30	81±3,0
	90	5,05±0,25	6,64±0,25	110±4,0
	120	5,25±0,25	6,80±0,20	150±5,0

В ході експерименту, було підтверджено попередні результати досліджень електроіскрового диспергування гранул інших металів, зокрема магнію і мангану, в середовищі сироватки молочної, які засвідчили зростання частки мікрофракції зі збільшенням часу оброблення до 90...120 с (Кочубей-Литвиненко, 2021). Це явище можна пояснити зростанням величини електропровідності з часом оброблення (табл. 4.2), що, як було вже відмічено раніше, перешкоджає інтенсивності електроіскрових розрядів і, як наслідок, зростає саме кількість частинок у мікророзмірному діапазоні, що для нас не є прийнятним.

В роботі (Кочубей-Литвиненко, 2021) доведено зростання окисно-відновного потенціалу в сироватці молочної після електроіскрового диспергування гранул магнію чи мангану. Нашими дослідженнями процесу електроіскрового диспергування гранул цинку в середовищі сироватки молочної як з-під сиру кисломолочного, так й підсирної було підтверджено дану тенденцію також. Даний показник збільшувався з 12...15 мВ у вихідній сироватці до 168±6,0 в підсирній сироватці і до 150±5,0 в

сироватці молочній з-під сиру кисломолочного. Подібно до попередніх дослідників (Кочубей-Литвиненко, 2021; Кочубей-Литвиненко, Іщенко та ін., 2015) пояснюючи це явище ми схилиємося до думки, що це говорить про можливе проходження в системі процесу $M \leftrightarrow M^{n+} + ne$, де M – відповідний метал, e – вільні електрони, а також про ймовірне комплексоутворення між іонами цинку та біолігандами сироватки.

Спільно з іншими дослідниками (Кочубей-Литвиненко, Висоцький та ін., 2020) доведено відсутність істотних змін у фракційному складі дослідних зразків сироватки молочної після електроіскрового диспергування гранул металів. Спостерігалось зниження фракцій протеїнів сироватки молочної з діапазоном молекулярних мас 14,2...18,4 кДа за одночасного зростання фракцій високомолекулярних протеїнів. Хоча ці зміни були несуттєвими, проте варто припустити, що відбувається це через ймовірне агрегування протеїнів з діапазоном молекулярних мас 14,2...18,4 кДа між собою під впливом електрофізичних чинників.

При електроіскровому обробленні сироватки молочної протягом 30...90 с у середовищі струмопровідних гранул цинку органолептичні характеристики залишалися незмінними. Однак за тривалості оброблення 120 с у зразках почали з'являтися негативні дескриптори смаку та запаху. Очевидно, це пов'язано із зростанням мікрофракції цинковмісних частинок і вказує на граничний поріг застосування такого методу для збагачення сироватки молочної.

Враховуючи позитивні зміни в сироватці молочній під час її електроіскрового оброблення в електророзрядній камері зі струмопровідними гранулами цинку, зокрема збагачення частинками цинку у нано- та ультрадисперсному розмірному діапазонах, зростання окисно-відновного потенціалу, відсутність суттєвих змін у білкових речовинах та негативного впливу на органолептичні властивості за оброблення протягом

30...60 с, було вирішено продовжувати дослідження шляхів інтенсифікації ферментування сироватки саме за рахунок такого мінерального збагачення.

4.3 Дослідження впливу наночастинок ZnO на інтенсифікацію сироватки молочної

На наступному етапі дослідження було проведено аналіз процесу ферментування молочної сироватки, збагаченої частинками ZnO, у порівнянні з контрольними зразками та сироваткою, збагаченою ZnSO₄ (рис. 4.5).

Перед поданням результатів динаміки наростання кислотності наведемо розшифровку кодованих зразків, що використовувалися в експерименті:

Контрольний зразок — молочна сироватка, ферментована без попереднього оброблення та без додавання цинкових сполук.

Зразок 1 — молочна сироватка, оброблена електроіскровим методом із застосуванням струмопровідних гранул цинку протягом 30 секунд.

Зразок 2 — молочна сироватка, оброблена електроіскровим методом із застосуванням струмопровідних гранул цинку протягом 60 секунд.

Зразок 3 — молочна сироватка, оброблена електроіскровим методом із застосуванням струмопровідних гранул цинку протягом 90 секунд.

Зразок 4 — молочна сироватка, оброблена електроіскровим методом із застосуванням струмопровідних гранул цинку протягом 120 секунд.

Зразок 5 — молочна сироватка, до якої перед ферментацією було додано сіль цинку (ZnSO₄) у кількості, що відповідає концентрації цинку, отриманій у зразку після оброблення протягом 60 секунд.

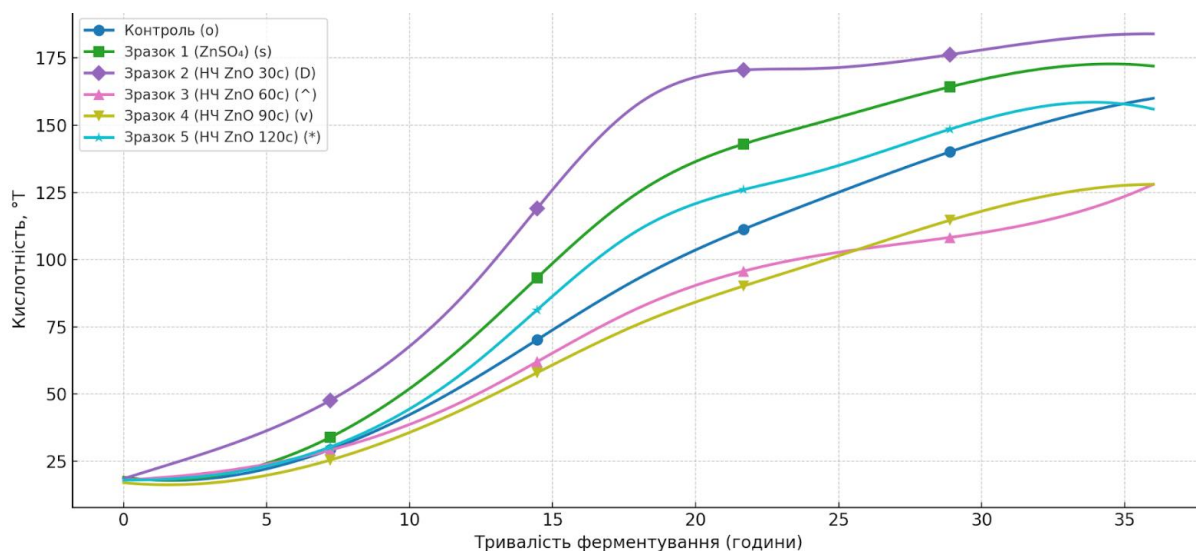


Рисунок 4.5 - Динаміка наростання кислотності під час ферментування сироватки молочної, збагаченою НЧ ZnO, в порівнянні із контролем та додаванням солі ZnSO₄

Дослідження показали, що для всіх експериментальних зразків характерним було поступове зростання титрованої кислотності під час ферментування молочної сироватки, заквашеної чистими культурами *Lactobacillus acidophilus*.

Проте слід зазначити, що у зразках 1–2, збагачених наночастинками ZnO внаслідок електроіскрового оброблення протягом 30...60 с, процес накопичення титрованої кислотності (ΔT) відбувався інтенсивніше порівняно з контролем та зразком 5. Так, після 24 год ферментування рівень титрованої кислотності у зразках 1–2 досягав 150...171°Т залежно від тривалості оброблення, тоді як у зразку 5 цей показник становив лише 132°Т. У контрольному зразку титрована кислотність за аналогічний період була найнижчою та становила 121°Т.

Встановлено, що збільшення тривалості електроіскрового оброблення до 90...120 с. (зразки 3 та 4) приводило до уповільнення процесу ферментування. Це можна пояснити збільшенням кількості металевих частинок у мікророзмірному діапазоні та, як наслідок,

зміщенням рН сироватки у лужний бік, що створювало менш сприятливі умови для росту молочнокислих бактерій.

Найвищу кислотоутворюючу активність культура *Lactobacillus acidophilus* проявляла у зразку 2, де молочна сироватка була оброблена у розрядній камері зі струмопровідним шаром гранул Zn при тривалості оброблення 60 с. (Рис. 4.6)

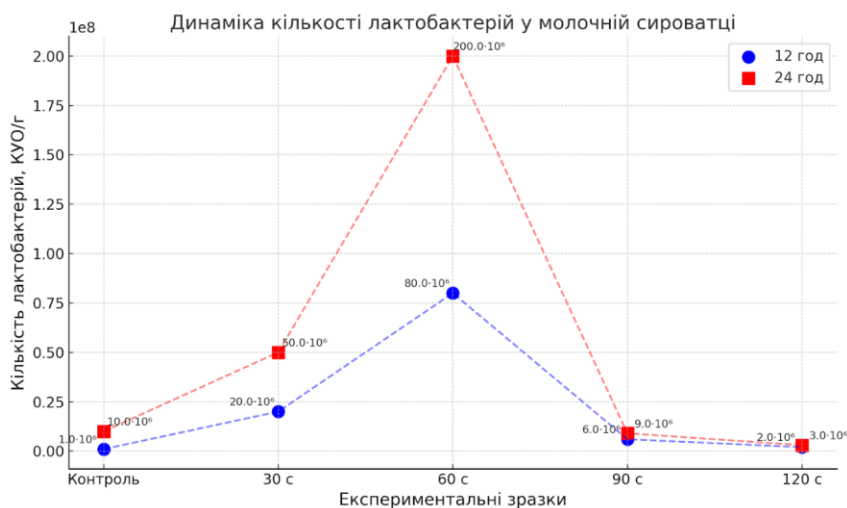


Рисунок 4.6 – Зміна кількості лактобактерій під час ферментування сироватки молочної, обробленої електроіскровими розрядами за різної тривалості

Крім того, встановлено, що досягнення необхідної кислотності ($160 \pm 10^\circ\text{T}$) у сироватці, збагаченій наночастинками ZnO (зразок 2, 60 с оброблення), відбувалося в середньому через 18 годин. Для порівняння, у сироватці з додаванням ZnSO₄ цей процес займав 28...30 год, а в контрольному зразку – 32...36 год ферментування. Це підтверджує, що наночастинки ZnO є ефективними інтенсифікаторами ферментаційного процесу, що дозволяє значно скоротити його тривалість та покращити технологічні властивості молочної сироватки.

Дані результати інтенсифікації ферментування можуть бути посилені збагаченням сироватки молочної не тільки наноцинком, а ще й частинками магнію і мангану в нано- та ультрарозмірному діапазоні, отриманими

подібним способом. Перспективи такого поєднання розкриті у роботах (Кочубей-Литвиненко, Пухляк & Щербатюк, 2023; Роговий, Висоцький & Кочубей-Литвиненко, 2025) та пояснюються збільшенням поживних для молочнокислих бактерій мікро- та макроелементів.

На основі отриманих результатів, можна зробити висновок щодо перспективності використання нано-ZnO у технологічних процесах, що потребують підвищення мікробіологічної стабільності. Проте для забезпечення контрольованого застосування необхідні подальші дослідження, спрямовані на оптимізацію дозування, оцінку довготривалого впливу наночастинок на мікробіоту та аналіз їх потенційного біологічного впливу на організм людини.

4.4 Дослідження перспектив використання ферментованої сироватки, збагаченої цинком, в технологіях харчових продуктів

4.4.1 Використання ферментованої сироватки, збагаченої цинком, в якості коагулянта в технології м'яких сирів термокислотного зсідання

На основі результатів, викладених у попередніх підрозділах, було встановлено, що електроіскрове оброблення молочної сироватки цинковими гранулами сприяє активізації росту молочнокислих бактерій *Lactobacillus acidophilus* та прискоренню процесу накопичення титрованої кислотності до цільового рівня (170 ± 10 °T). Підвищення кислотності ферментованої сироватки створює передумови для її використання як природного коагулянта у виробництві м'яких сирів термокислотного зсідання.

Таким чином, наступним етапом дослідження стало вивчення ефективності застосування ферментованої молочної сироватки, збагаченої біодоступним цинком, у якості коагулянта для ініціювання процесу термокислотного зсідання молочних білків та оцінка якості отриманого сирного продукту.

В останні десятиліття спостерігається зростання наукового інтересу щодо використання побічних продуктів молочної промисловості для створення нових харчових продуктів із високою біологічною цінністю. Молочна сироватка є джерелом біодоступних білків, лактози, мінералів та біоактивних пептидів, що робить її перспективною сировиною для переробки у продукти функціонального харчування (Smithers, 2008).

Одним із актуальних напрямків використання молочної сироватки є її застосування у якості натурального коагулянта в технології м'яких сирів термокислотного зсідання. За рахунок природного накопичення кислотності в процесі ферментації молочнокислими бактеріями, ферментована сироватка може ефективно замінювати сторонні кислоти або хімічні коагулянти у виробництві сирів.

Таким чином, на основі літературних та експериментальних досліджень з підрозділів 4.1., 4.2. та 4.3. можна дійти висновку, що використання ферментованої сироватки як коагулянта для м'яких сирів може надати наступні переваги:

- збереження природного складу продукту без штучних добавок;
- підвищення харчової цінності сирів завдяки наявності додаткових біоактивних компонентів сироватки;
- скорочення технологічного циклу за рахунок прискорення зсідання білків.

Особливу увагу привертає можливість попереднього збагачення сироватки мікроелементами, зокрема цинком, який є важливим кофактором ферментативних систем і бере участь у стабілізації білкових структур (Prasad, 2013). Збагачення ферментованої сироватки цинком потенційно підсилює її коагулюючі властивості та сприяє покращенню структурно-механічних характеристик сирного згустку.

Враховуючи зазначене, наступним етапом роботи стало експериментальне дослідження можливості використання ферментованої

молочної сироватки, збагаченої біодоступним цинком шляхом електроіскрового оброблення, як натурального коагулянта у виробництві м'яких сирів термокислотного зсідання.

Основні підходи до організації технологічного процесу, а також базові параметри виробництва м'яких сирів були адаптовані на основі результатів, отриманих у попередніх дослідженнях щодо збагачення молочної сироватки магнієм та манганом (Кочубей-Литвиненко, 2021). Водночас, з урахуванням специфіки фізико-хімічних властивостей цинку та цільових показників ферментації, експериментальна схема була модифікована відповідно до завдань цього дослідження.

За результатами виробництва м'яких сирів методом термокислотного зсідання із застосуванням ферментованої молочної сироватки, збагаченої біодоступним цинком, було проведено порівняльний аналіз основних характеристик отриманих сирів. Для порівняння до дослідження було включено також контрольні зразки, виготовлені без використання електроіскрового оброблення сироватки (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Порівняльний аналіз впливу ферментованої сироватки, збагаченої Zn, на технологічний процес та якість термокислотного сиру

Показник	Традиційний технологічний процес (контроль)	Виробництво із застосуванням ферментованої сироватки (збагаченої Zn)
<i>Ферментація сироватки молочної</i>		
Тривалість ферментації до досягнення кислотності 150 ± 5 °Т, год	$32 \pm 0,5$	$17 \pm 0,5$
<i>Термокислотне зсідання білка</i>		

Втрати білка в сироватку після зсідання, %	26,7 ±1,0	– 5,0 %
Вміст Zn у сироватці після зсідання, мкг/ 100 г	187,2±6,5	збільшення на 25 %
<i>Готовий продукт</i>		
Вміст Zn, мг/кг	40,0±0,5	зростання на 40 %
Вихід сиру з 1 кг молока, г	110±0,5	збільшення на 7 %

Результати, наведені у таблиці, засвідчують позитивний вплив ферментованої молочної сироватки, збагаченої цинком шляхом електроіскрового оброблення, на ключові параметри технологічного процесу та якість готового сирного продукту.

На етапі ферментації сироватки зафіксовано зменшення тривалості досягнення цільової кислотності на 15 годин порівняно з контрольним варіантом, що підтверджує експериментальні дослідження описані в розділі 4.3.

Під час термокислотного зсідання білків спостерігалось зменшення втрат білка з сироватковою фракцією на 5,0 %, що є ознакою більш повного переходу білків у склад згустку. Водночас вміст Zn у сироватці після зсідання був на 25 % вищим, що свідчить про здатність цинку зберігатися у рідкій фазі навіть після теплової обробки.

Готовий продукт, отриманий із використанням ферментованої сироватки, мав вищий рівень цинку (на 40 %) і демонстрував збільшення виходу на 7 % у порівнянні з контролем. Це підкреслює не лише ефективність ферментаційного процесу, але й додаткову харчову цінність готового продукту.

Таким чином, застосування ферментованої сироватки, збагаченої цинком, дозволяє оптимізувати ключові етапи виробництва м'яких сирів

термокислотного зсідання та створює передумови для розробки збагачених функціональних молочних продуктів.

4.4.2 Використання кислої сироватки молочної, збагаченої цинком, в технології житньо-пшеничного хліба

Даний підрозділ має на меті навести наукове обґрунтування застосування сироватки молочної в хлібопекарській галузі для виробництва житньо-пшеничного хліба.

Наукове обґрунтування застосування молочної сироватки у технології хлібопекарських виробів стало предметом численних досліджень вітчизняних вчених, серед яких В.І. Дробот, І.А. Рейтер, Н.О. Чумаченко, В.Ф. Доценко, О.А. Білик, Т.О. Васильченко та ін.. Їхні роботи підтверджують, що використання сироватки та її похідних не лише збагачує хлібобулочні вироби біологічно активними речовинами, але й покращує їхні органолептичні та фізико-хімічні характеристики. Обсяги виробництва молочної сироватки в Україні, що визначаються на основі випуску сичужних, кисломолочних, свіжих неферментованих сирів та казеїну (Kozak, Hryshchenko, & Vasylchenko, 2019), на сьогодні становлять близько 900 тисяч тонн (без урахування тимчасово окупованих територій). Це дозволяє стверджувати, що молочна сироватка є важливим резервом не лише для молокопереробної галузі, а й для харчової промисловості в цілому.

Молочна сироватка відіграє важливу роль у хлібопекарських технологіях, оскільки сприяє активації мікрофлори рідких дріжджів, дріжджової суспензії, рідких заквасок, а також інтенсифікації процесу приготування тіста. Використання сироватки підвищує харчову цінність та функціональні властивості хлібобулочних виробів, що особливо важливо при опарному та прискореному методах приготування тіста, оскільки дозволяє зекономити борошно (Drobot, 2002).

У технології житньо-пшеничного хліба особливу роль відіграє підкислення тіста, яке сприяє зниженню активності ферментів, покращенню набухання білків, пентозанів та оболонкових частинок борошна (Sylchuk et al., 2015). Для цього може використовуватися кисла сироватка, яка виконує функцію натурального підкислювача. Оптимальним рівнем титрованої кислотності для стабілізації процесу приготування тіста та покращення якості готової продукції є 160–180 °Т.

Цей підхід є перспективним, оскільки поряд із прискоренням ферментування, відбувається збагачення хлібобулочних виробів мінеральними елементами.

Також, зважаючи на доцільність збагачення хлібобулочних виробів цінними мінеральними речовинами, було досліджено вплив сироватки, збагаченої Zn, на параметри процесу її ферментування.

Таблиця 4.4 – Вплив сироватки, збагаченої Zn, на параметри процесу ферментування

Показник	Значення показника	Порівняльне значення відносно контролю
	Контроль	Експериментальний зразок
Тривалість ферментування до досягнення кислотності (170±10 °Т), год	32±0,5	– 2,0 рази
Кількість лактобактерій, КУО/г, під час ферментування		
12	$(1±0,05) \cdot 10^6$	$+(1 \cdot 10^2)$
24	$(1±0,05) \cdot 10^7$	$+(5 \cdot 10^1)$
Вміст Zn у ферментованій сироватці, мкг/100 г	285±10,2	+1,5 рази

На наступному етапі дослідження вивчався вплив ферментованої сироватки, збагаченої цинком (Zn), на технологічний процес та якість житньо-пшеничного хліба. Для цього було проведено пробне лабораторне

випікання, під час якого тісто готували на густій заквасці за рецептурою хліба «Особливий» (цей хліб використовувався як контрольний зразок).

Ферментовану сироватку, а також ферментовану сироватку, збагачену Zn, додавали у кількості 15 % від маси борошна, відповідно до літературних джерел (Wronkowska et al., 2015; Reuter, Drobot, & Chumachenko, 1970). Якість тіста і хліба оцінювали за фізико-хімічними та органолептичними показниками, а також за комплексним показником якості. Отримані результати представлені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Вплив ферментованої сироватки, збагаченої магнієм, манганом і цинком, на якість тіста та хліба (n=3, p≥0,95)

Показники якості хліба	Хліб		
	Контроль (без добавок)	Ферментована сироватка	Сироватка ферментована збагачена Zn
Тісто			
Вміст вологи, %	48,0		
Титрована кислотність, градуси:			
Початкова	5,2	6,8	6,7
Кінцева	7,0	9,4	9,4
Тривалість ферментування, хв	90		
Тривалість вистоювання, хв	50	40	35
Питомий об'єм тіста, см ³	120	132	144
Розтікання тістового кульки, мм	102	92	96
Газоутворення під час бродиння і вистоювання, см ³ /100 г	1136	1320	1456
Готова продукція			
Питомий об'єм, см ³ /100 г	226	244	252

Пористість, %	64,0	68,	71,0
Кислотність, градуси	6,4	8,2	8,0
Формостійкість	0,36	0,40	0,42
Комплексний показник якості	89,0	93,2	95,3

Було встановлено, що додавання ферментованої сироватки, а також ферментованої сироватки, збагаченої цинком (Zn), сприяє підвищенню кислотності тіста порівняно з контрольним зразком. Це явище спостерігалось протягом усього періоду ферментування. Використання усіх дослідних зразків сироватки активізувало процес бродіння, про що свідчить підвищене накопичення вуглекислого газу як під час ферментування, так і в процесі вистоювання. Це пояснюється збагаченням тіста поживними речовинами, необхідними для життєдіяльності дріжджів. Активізація дріжджів у тісті з ферментованою сироваткою призводить до скорочення часу вистоювання. Додавання ферментованої сироватки та ферментованої сироватки, збагаченої Zn, також зменшує розпливання тістової кульки, що, ймовірно, пов'язано з впливом молочної кислоти на білково-протеазний комплекс.

Дослідження якості готового хліба показало, що завдяки збільшенню газоутворення, підвищенню питомого об'єму тіста та покращенню еластичності клейковинного каркасу, додавання ферментованої сироватки та її збагачених варіантів сприяє збільшенню питомого об'єму хліба. Таким чином, у хлібі з ферментованою сироваткою цей показник зріс на 7,9 %, а у хлібі із сироваткою, збагаченою Zn, – на 11,5 % порівняно з контрольним зразком (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Вплив добавок на якість хліба: 1 – контроль, 2 – з ферментованою сироваткою, 3 – з ферментованою сироваткою, збагаченою цинком.

Було встановлено, що додавання ферментованої сироватки, а також ферментованої сироватки, збагаченої цинком (Zn), покращує формостійкість виробів, що робить цей продукт придатним як для подового, так і для формового випікання. Результати досліджень показали, що найвищий комплексний показник якості був досягнутий у хлібі з ферментованою сироваткою, збагаченою магнієм, манганом і цинком.

З літературних джерел відомо, що використання сироватки сприяє подовженню свіжості хлібобулочних виробів. Тому доцільним було дослідити вплив ферментованої сироватки та ферментованої сироватки, збагаченої магнієм, манганом і цинком, на збереження свіжості хлібобулочних виробів. Процес черствіння оцінювали за загальною деформацією м'якуша та крихтуватістю (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 – Вплив ферментованої сироватки, збагаченої магнієм, манганом і цинком, на процес черствіння (n=3, p≥0,95)

Показники якості хліба	Хліб		
	Контроль (без добавок)	Сироватка ферментована	Сироватка ферментована збагачена Zn
Крихкість м'якуша, %			
після 4 годин	1,2	1,0	1,2
після 72 годин	3,2	2,7	2,6
Зміна деформації м'якуша під час зберігання, умовні одиниці			
4 години			
Загальна	58	70	75
Пластична	42	48	51
Еластична	16	22	24
72 години			
Загальна	23	29	33
Пластична	17	20	23
Еластична	6	9	10
Свіжість, %			
4 години	100	100	100
72 години	39,7	41,4	44,0

Ступінь черствіння визначали за показником крихтуватості м'якуша після 72 годин зберігання. Як показують отримані дані, у хлібі з ферментованою сироваткою, збагаченою цинком (Zn), цей показник зменшився на 26,0 % і 31,0 % відповідно порівняно з контрольним зразком після 72 годин зберігання. Це зумовлено додатковим вмістом білків і лактози у сироватці, які позитивно впливають на структуру м'якуша та уповільнюють процеси його черствіння. Отримані дані підтверджуються ступенем збереження свіжості виробів.

Науково встановлені технологічні аспекти інтенсифікації процесу ферментування сироватки завдяки використанню мінерального збагачення методом іскрового розряду стали основою для розробки технологічних рекомендацій щодо вдосконалення методу отримання кислої сироватки як харчового інгредієнта для житньо-пшеничних хлібобулочних виробів.

Доведено, що тривалість ферментування скорочується майже вдвічі в результаті збагачення сироватки цинком (Zn), що пояснюється збільшенням вмісту необхідних мікро- та макроелементів для живлення клітин лактобактерій.

Запропонована технологія виробництва ферментованої кислої сироватки як харчового інгредієнта для житньо-пшеничних хлібобулочних виробів у порівнянні з існуючими технологіями має ряд переваг: скорочує виробничий цикл отримання інгредієнта вдвічі; підвищує коефіцієнт використання технологічного обладнання; не вимагає значних виробничих площ для встановлення технологічного комплексу іскрової обробки та зменшує потребу у ємностях (ферментерах) завдяки скороченню часу ферментування; прискорює технологічний процес виготовлення хлібобулочних виробів із суміші житнього та пшеничного борошна.

Спосіб виробництва хліба житньо-пшеничного з використанням сироватки молочної ферментованої кислої, збагаченої наночастинками цинкоксиду було апробовано у виробничих умовах ФОП «Білохатнюк Володимир Олександрович» (Додаток Б)

4.4.3 Удосконалення способу ферментування сироватки молочної кислої шляхом збагачення нано-ZnO

Метою цього підрозділу є розроблення та наукове обґрунтування удосконаленого способу ферментування молочної сироватки кислої за рахунок її збагачення наночастинками оксиду цинку (ZnO), отриманими методом електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металу

безпосередньо у рідкому середовищі. Запропонований підхід передбачає не лише покращення технологічних показників ферментації, таких як пришвидшення сквашування та досягнення вищої кислотності, але й підвищення харчової цінності продукту завдяки надходженню біологічно активного цинку, що було досліджено у попередніх підрозділах 4.4.1 та 4.4.2.

Удосконалений спосіб ферментування кислої молочної сироватки передбачає включення етапу збагачення сировини наночастинками оксиду цинку, що здійснюється методом електроіскрового оброблення. Цей етап інтегрується у технологічну лінію перед внесенням закваски та ферментацією.

Для реалізації оброблення використовується електророзрядний технологічний модуль, до складу якого входить камера з цинковими струмопровідними гранулами, в якій під впливом імпульсного електричного струму формується нанофаза ZnO. Збагачення сироватки здійснюється за раніше встановленими оптимальними у підрозділі 4.2 параметрами.

Принципова та апаратурно-технологічна схема виробництва ферментованої молочної сироватки зі збагаченням наночастинками ZnO включає стандартні вузли підготовки сировини та ферментації, розширені за рахунок електроіскрової камери з цинковими електродами (рис. 4.8 та 4.9).



Рисунок 4.8 – Принципова технологічна схема виробництва ферментованої молочної сироватки зі збагаченням наночастинками ZnO

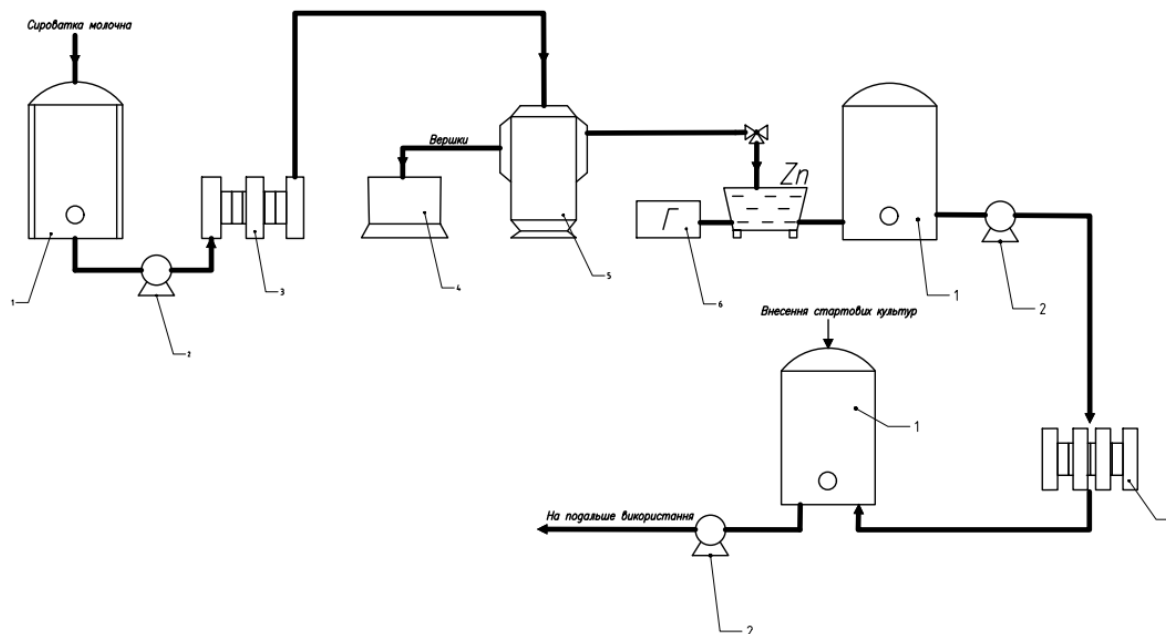


Рисунок 4.9 – Апаратурно-технологічна схема виробництва ферментованої молочної сироватки зі збагаченням наночастинками ZnO

Умовні позначення: 1 – резервуар, 2 – насос подачі, 3 – пластинчастий підігрівник, 4 – ємність для збирання вершків, 5 – сепаратор, 6 – генератор розрядних імпульсів, 7 – електророзрядна камера зі струмопровідним шаром гранул цинку, 8 – пластинчастий теплообмінник

Технологічний процес виробництва кислої молочної сироватки, збагаченої наночастинками ZnO, реалізується в такій послідовності:

Після приймання молочну сироватку охолоджують до температури 6 ± 2 °C та тимчасово резервують у відповідних ємностях до подальшої обробки. Після чого здійснюється підігрів до температури 40 ± 5 °C з метою зниження в'язкості та покращення умов для наступного технологічного етапу. За потреби проводиться сепарування сироватки з відокремленням підсирних вершків.

Наступним етапом є електроіскрове оброблення сироватки в електророзрядній камері зі струмопровідним шаром гранул цинку, де під

дією імпульсного електричного струму відбувається генерація наночастинок оксиду цинку (ZnO) безпосередньо в об'ємі рідини. Оброблення здійснюється на експериментальному електроіскровому комплексі за таких параметрів:

напруга заряду конденсатора — 80...100 В,

ємність конденсатора — 100 мкФ,

міжелектродна відстань — 0,01...0,1 мм,

тривалість оброблення — 30...60 с.

Після електроіскрової обробки збагачену сироватку піддають пастеризації при температурі 76 ± 2 °С, а потім охолоджують до температури заквашування — 40 ± 2 °С.

Наступним етапом є внесення заквасок молочнокислих бактерій (наприклад, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*, *Lactococcus lactis* або *Lactobacillus acidophilus*) та сквашування у термостатованих умовах до досягнення кислотності на рівні 150–170 °Т.

Готова ферментована сироватка надалі спрямовується на подальше використання — для виготовлення сирів м'яких термокислотним зсіданням, або до рецептур хліба житньо-пшеничного як функціональний інгредієнт (підкислювач).

Технологія сироватки кислої, збагаченої цинком перед процесом ферментації, була апробована на ТОВ «Галіївський маслозавод» (Додаток В).

Оптимальним режимом електроіскрового збагачення встановлено оброблення тривалістю 60 с, за якого молочна сироватка досягала цільової кислотності (170 ± 10 °Т) вже через 12...18 год, тоді як контрольний зразок — лише після 30 год. У випадку надмірного подовження оброблення до 120 с спостерігалось уповільнення ферментації, що, ймовірно, пов'язано зі збільшенням частки мікрочастинок металу та зсувом рН у лужний бік, що гальмує розвиток молочнокислої мікрофлори.

Таким чином, додавання наноформи ZnO у певному технологічно обґрунтованому режимі сприяє інтенсифікації процесу ферментації, зменшенню її тривалості та підвищенню ефективності сквашування кислої сироватки.

4.5 Біобезпека наночастинок ZnO: цитотоксичний вплив

У попередніх підрозділах було досліджено перспективність застосування наночастинок ZnO для інтенсифікації ферментативних процесів сироватки молочної та подальшому застосуванні у виробництві м'яких сирів термокислотного зсідання та хлібопекарській галузі.

В умовах зростання інтересу до використання наноматеріалів у харчовій промисловості надзвичайно важливим є забезпечення їхньої біобезпеки. Оцінка токсикологічного профілю наночастинок ZnO є необхідною передумовою для їх впровадження в якості функціонального інгредієнта. У цьому підрозділі представлено результати двоетапного дослідження: (1) впливу наночастинок ZnO на білки плазми крові людини як маркер цитотоксичності та (2) аналізу функціональної активності макрофагів щурів після *in vitro*-інкубації із ZnO у порівнянні з сіллю ZnSO₄.

4.5.1 Оцінка цитотоксичності наночастинок ZnO за впливом на білкові структури

Вибір білків плазми крові як альтернативи класичним токсикологічним дослідженням на тваринах зумовлений етичними принципами та прагненням до скорочення чисельності тварин в експериментах. Такий підхід є особливо актуальним, зважаючи на життєво важливу роль цинку в організмі людини.

Цей мікроелемент посідає друге місце за поширеністю після заліза та є необхідним для генної експресії, метаболізму нуклеїнових кислот, а також для всіх процесів росту і диференціації клітин. Цинк входить до складу біологічних мембран, клітинних рецепторів, протеїнів і понад 200 ензимних систем, що регулюють основні метаболічні процеси, забезпечуючи

нормальне функціонування організму. Саме тому оцінка його впливу в різних формах на білкові структури є важливим завданням дослідження.

Наразі в Україні та світі дослідження з оцінки цитотоксичності ксенобіотиків проводяться альтернативними методами, зокрема на первинних культурах клітин і тканин, виділених із організму тварин і/або людини, а також на перещеплюваних клітинах, отриманих з окремих видів пухлин. Для цього створено великий банк клітинних ліній, які мають різне видове походження та виділені з різних органів. Тестування на культурах клітин надає інформацію про потенційну цитотоксичну дію речовини, дозволяючи оцінити загальну цитотоксичність, що виражається у несприятливому впливі речовини на структуру та функції клітин. Це оцінюється за здатністю клітин до виживання, проліферації та збереження функціональної активності. На клітинному рівні визначають три основні механізми цитотоксичної дії: пошкодження клітинних мембран, порушення процесів метаболізму та розлади регуляції поділу клітин (ICCVAM, 2001; Дмитруха, 2013).

У роботі (Дубівко та ін., 2022) продемонстровано позитивний ефект від використання колоїдного розчину цинку, отриманого методом електроіскрового диспергування струмопровідних гранул цинку у водному середовищі, під час пророщування зерна для подальшого застосування у виробництві харчових продуктів. Для збагачення молочної сироватки та, як наслідок, покращення її технологічно-функціональних властивостей і інтенсифікації ферментативних процесів застосовують металовмісні частинки магнію, марганцю та цинку у нано- та ультрарозмірних діапазонах, отримані за тією ж технологією, що й у попередньо згаданій роботі (Кочубей-Литвиненко & Лопатько, 2021; Кочубей-Литвиненко та ін., 2023).

Відомо, що наночастинки, потрапивши у кров, лімфу, шлунковий сік або будь-яку іншу біологічну рідину, активно взаємодіють із білками

(Трахтенберг & Дмитруха, 2013; Kharazian, Nadipour & Ejtehad, 2016). Завдяки високій поверхневій енергії наночастинки можуть руйнувати ковалентні зв'язки високомолекулярних білків, а також адсорбувати їх на своїй поверхні, утворюючи так звану «корону». Це явище визначається електростатичною взаємодією заряджених груп білкових молекул, а також їх високою спорідненістю до поверхні наночастинок. Взаємодія наночастинок із білками може призводити до змін їхніх властивостей, що впливає як на поведінку наночастинок, так і на функціональність білкових молекул. Основними білками, що утворюють «корону» наночастинок, є альбумін, імуноглобуліни, фактори комплементу, фібриноген та аполіпопротеїни. Покривання наночастинок цими білками значною мірою визначає їх подальшу долю в організмі, зокрема розподіл між тканинами та органами, швидкість виведення, опсонізацію і фагоцитоз.

Крім того, взаємодія білків із наночастинками впливає на їх розчинність. Наприклад, органічні речовини можуть збільшувати розчинність наночастинок ZnO, CdSe, а також оксидів заліза й алюмінію, проте водночас наночастинки можуть впливати на білкові молекули, спричиняючи їхню агрегацію, окислення бічних груп, зниження ферментативної активності або зміну конформації (Kharazian, Nadipour & Ejtehad, 2016).

Результати вимірювання оптичної густини альбуміну та імуноглобуліну G після їх інкубації з НЧ ZnO і ZnSO₄ представлені в таблицях 4.7. та 4.8.

Таблиця 4.7 - Результати визначення денатурації білків плазми крові людини після інкубації з НЧ ZnO

Концентрація за Zn, мг/см ³	Одиниці оптичної густини	Денатурація імуноглобуліну за присутності НЧ ZnO, %	Одиниці оптичної густини	Денатурація альбуміну за присутності НЧ ZnO, %
0,450	0,928±0,005	63,75±0,29	0,574±0,002	27,63±0,23
0,225	0,483±0,008	33,17±0,45	0,315±0,001	15,16±0,14
0,113	0,180±0,001	12,34±0,03	0,311±0,001	14,97±0,14
0,056	0,123±0,002	7,90±0,08	0,164±0,001	7,90±0,07
0,028	0,115±0,001	7,76±0,17	0,129±0,002	6,23±0,05
0,014	0,100±0,001	6,87±0,05	0,150±0,004	7,21±0,13
0,007	0,079±0,001	5,43±0,06	0,079±0,001	3,81±0,07
0,004	0,069±0,001	4,72±0,04	0,062±0,002	3,00±0,05
0,9 % NaCl (негативний контроль)	0,052±0,001	-	0,064±0,002	-
0,1н HCl (позитивний контроль)	1,455±0,03	100	2,077±0,018	100

Таблиця 4.8 – Результати визначення денатурації білків плазми крові людини після інкубації з розчином солі ZnSO₄

Концентрація за Zn, мг/см ³	Одиниці оптичної густини	Денатурація імуноглобуліну за присутності ZnSO ₄ , %	Одиниці оптичної густини	Денатурація альбуміну за присутності ZnSO ₄ , %
0,450	0,773±0,010	53,10±0,66	1,142±0,001	54,92±0,49
0,225	0,311±0,002	21,35±0,13	0,816±0,007	39,30±0,57
0,113	0,215±0,005	14,78±0,33	0,786±0,007	37,85±0,43

0,056	0,134±0,002	9,19±0,10	0,355±0,003	17,11±0,15
0,028	0,092±0,001	6,06±0,29	0,149±0,005	7,19±0,31
0,014	0,067±0,002	4,60±0,01	0,055±0,001	2,64±0,04
0,007	0,054±0,001	3,69±0,04	0,039±0,001	1,89±0,04
0,004	0,056±0,001	3,80±0,02	0,038±0,001	1,81±0,02
0,9% NaCl (негативний контроль)	0,052±0,001	-	0,064±0,002	-
0,1н HCl (позитивний контроль)	1,455±0,03	100	2,077±0,018	100

Отримані результати дослідження оптичної густини дослідних зразків у порівнянні з контролем свідчать, що ступінь денатурації білків залежав від концентрації досліджуваних сполук. Найбільш виражену токсичну дію наночастинки ZnO та іони ZnSO₄ проявляли при концентраціях 0,45 мг/см³ і 0,225 мг/см³, тоді як дози 0,014; 0,007 і 0,004 мг/см³ обох форм цинку не мали суттєвого впливу на структуру білкових молекул. Встановлено, що наночастинки ZnO виявляли більшу активність по відношенню до імуноглобуліну, тоді як вплив іонів Zn на структуру обох білків був однаковим.

За даними наукових джерел (Дмитруха, 2021), здатність цинку брати участь у процесах лігандоутворення з органічними молекулами пояснює його надзвичайно широкий спектр присутності у різних біологічних системах. Це зумовлює відносну безпеку цього елемента, сприяє покращенню його транспорту та метаболізму в організмі, а також забезпечує швидке біологічне засвоєння цинку клітинами.

Встановлено, що цитотоксичність наночастинок цинку та солі ZnSO₄ залежала від концентрації досліджуваних сполук. Найбільша токсичність щодо імуноглобуліну та альбуміну плазми крові проявлялася за присутності

ZnO і ZnSO₄ у дозах 0,225...0,45 мг/см³. Водночас доведено, що концентрації 0,014; 0,007 і 0,004 мг/см³ обох препаратів цинку не мали суттєвого впливу на структуру білків плазми крові.

Підсумовуючи отримані дані, можна дійти висновку, що подальше вивчення особливостей та механізмів потенційної токсичності наночастинок ZnO може сприяти їх ефективному і безпечному практичному застосуванню у виробництві харчових продуктів на основі сироватки молочної. Зокрема, це може бути корисним під час створення оптимальних умов очищення молочної сироватки із застосуванням пірогенного кремнезему, інтенсифікації ферментування кислої сироватки тощо.

4.5.2 Визначення бактерицидної активності наночастинок ZnO методом НСТ-тесту в макрофагах щурів *in vitro*

Щоб оцінити вплив наночастинок ZnO порівняно з сіллю ZnSO₄ на функціональну активність фагоцитарних клітин, було проведено експериментальне дослідження із застосуванням НСТ-тесту на макрофагах, отриманих з перитонеального ексудату щурів.

Для ізоляції перитонеальних макрофагів у лабораторних щурів, попередньо анестезованих натрієм етаміналом, інтраперитонеально вводили 5 см³ середовища 199 з метою промивання черевної порожнини. Отриману клітинну суспензію двічі промивали тим самим середовищем, після чого підраховували кількість життєздатних клітин за допомогою трипанового синього в камері Горяєва. До експерименту допускали суспензії з життєздатністю не нижче 95 %. Клітини в концентрації 5×10⁶ клітин/см³ розміщували у 96-лункові планшети по 100 мкл на лунку. У дослідні лунки додавали розчини наночастинок ZnO або солі ZnSO₄ в концентраціях 1,13; 0,56; 0,28; 0,14 і 0,07 мг/см³. Інкубацію проводили протягом однієї години при 37 °С у присутності CO₂. Бактерицидну активність макрофагів оцінювали за рівнем продукції активних форм кисню шляхом проведення НСТ-тесту. Після інкубації клітинну суспензію

наносили на предметне скло, фіксували метанолом і фарбували 0,2 % розчином нейтрального червоного. Під мікроскопом визначали відсоток НСТ-позитивних клітин — тих, що містили гранули формагану темно-синього кольору (Дмитруха, Луговський та Лагутіна, 2015).

Результати експерименту показали, що після 24-годинної інкубації перитонеальних макрофагів з наночастинками ZnO у концентраціях 1,13 та 0,56 мг/см³ спостерігалось істотне зростання рівня НСТ-позитивних клітин — відповідно на 62,5 % та 28,5 % у порівнянні з контрольними значеннями. Аналогічне дослідження з використанням сульфату цинку (ZnSO₄) у тих самих концентраціях засвідчило підвищення активності макрофагів на 34,7 % та 13,2 % відповідно. Водночас застосування нижчих доз обох форм цинку (у межах 0,07...0,28 мг/см³) не призвело до статистично значущих змін показників продукції активних форм кисню в макрофагах (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Показники НСТ-тесту в макрофагах щурів після *in vitro* інкубації розчинами НЧ ZnO і ZnSO₄

Досліджувані концентрації, мг/см ³	Досліджувані речовини	
	НЧ ZnO	ZnSO ₄
0	14,4±2,3	14,4±2,3
0,07	14,1±0,5	13,9±0,1
0,14	14,4±0,5	15,4±0,5
0,28	17,8±0,6	15,0±1,4
0,56	18,5±0,5	16,3±0,2
1,13	23,4±0,8	19,4±0,1

Аналіз отриманих даних свідчить, що наночастинки ZnO у тестованих концентраціях мали дещо вищу здатність стимулювати бактерицидну активність макрофагів, порівняно з йонною формою цинку.

Серед усіх концентрацій найбільш виражений ефект спостерігався при дозі 1,13 мг/см³, яка забезпечувала максимальну активацію продукції активних форм кисню.

Ці результати узгоджуються з висновками дослідження Wahab та співавт. (2014), в якому антибактеріальну дію наночастинок ZnO (~13±2 нм) та солі оксиду цинку оцінювали методом дискової дифузії проти п'яти патогенних бактеріальних штамів. Автори засвідчили вищу бактерицидну активність наночастинок порівняно з йонною формою, що пояснюється, зокрема, фотокаталітичним утворенням пероксиду водню, а також здатністю наночастинок проникати в клітинну мембрану мікроорганізмів і викликати її руйнування (Wahab et al., 2014).

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що подальше вивчення механізмів цитотоксичної та бактерицидної дії наночастинок ZnO є важливою умовою для їх безпечного і науково обґрунтованого застосування в харчових технологіях. Зокрема, перспективними напрямками є використання ZnO як функціонального інгредієнта для пророщування зерна, покращення мікробіологічної якості молочної сироватки з використанням пірогенного кремнезему, а також для прискорення процесів ферментування кислої сироватки. Такий підхід відкриває можливості для створення інноваційних продуктів із підвищеною функціональною цінністю та біобезпекою.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ IV

На основі проведених досліджень науково обґрунтовано доцільність використання наночастинок оксиду цинку (ZnO), отриманих методом електроіскрового диспергування струмопровідних гранул металу, для інтенсифікації процесу ферментування сироватки молочної кислої та подальшого її застосування у технологіях харчових продуктів.

Установлено, що збагачення сироватки молочної наночастинами оксиду цинку внаслідок електроіскрового оброблення сприяє покращенню

умов для росту молочнокислих бактерій *Lactobacillus acidophilus*, що підтверджується скороченням тривалості досягнення титрованої кислотності (150–170°Т) з 32–36 год до 18 годин при обробленні протягом 60 с. Встановлено, що саме при такій тривалості оброблення досягається оптимальне співвідношення нанорозмірної фракції (до 50 %) та відсутність негативного впливу на органолептичні властивості продукту.

Досліджено функціонально-технологічні характеристики колоїдного розчину ZnO: середній гідродинамічний розмір частинок становив $101,3 \pm 5,0$ нм, індекс полідисперсності – 0,101, ζ -потенціал – $(15,4 \pm 0,7)$ мВ, що свідчить про високу седиментаційну стабільність системи. Елементний аналіз засвідчив наявність оксидної фази ZnO з переважанням кисню, що підтверджує формування нанофаз у водному середовищі.

Проведене електронно-мікроскопічне дослідження підтвердило морфологічну однорідність цинковмісних частинок. Встановлено також, що збагачення сироватки ZnO призводить до зростання її електропровідності та окисно-відновного потенціалу, що створює сприятливі умови для активізації ферментаційних процесів. При цьому суттєвих змін у білковому профілі сироватки не виявлено.

Визначено доцільність використання ферментованої сироватки, збагаченої ZnO, як натурального коагулянта в технології м'яких сирів термокислотного зсідання. Доведено скорочення технологічного циклу, зменшення білкових втрат і підвищення вмісту Zn у готовому продукті на 40 %, що позитивно впливає на харчову цінність сиру.

Встановлено, що застосування ферментованої сироватки, збагаченої ZnO, у рецептурі житньо-пшеничного хліба сприяє підвищенню кислотності тіста, активізації дріжджової мікрофлори, покращенню газоутворення, підвищенню питомого об'єму хліба (на 11,5 %), формостійкості та збереженню свіжості протягом 72 годин зберігання.

Розроблено та апробовано удосконалений спосіб ферментування кислої сироватки, який передбачає включення етапу електроіскрового збагачення наночастинками ZnO. Запропонована технологія реалізується у межах стандартної виробничої лінії з додаванням електророзрядного модуля та забезпечує скорочення тривалості ферментації у 1,8...2 рази. Апробація методу на ТОВ «Галіївський маслозавод» підтвердила його технологічну ефективність.

Таким чином, доведено ефективність застосування наноформ цинку як технологічного інструменту для збагачення молочної сироватки з метою інтенсифікації ферментативних процесів, підвищення харчової цінності продуктів та оптимізації виробничих показників у харчовій промисловості.

РОЗДІЛ V. СОЦІАЛЬНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОКОМПОЗИТИВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.

5.1 Вимоги Європейського Союзу до екологічної безпеки та сталого виробництва

Даний підрозділ має на меті провести аналіз законодавства Європейського Союзу щодо екологічної безпеки та сталого виробництва, для врахування цих аспектів при подальшому застосуванні нанокompatитів, зокрема наночастинок пірогенного кремнезему та оксиду цинку на вітчизняних підприємствах.

Впровадження нанотехнологій у харчову промисловість відкриває широкі можливості для покращення якості, стабільності та безпечності продуктів. Проте водночас такі технології викликають питання щодо їхнього впливу на здоров'я людини та довкілля, що потребує чіткої нормативно-правової регламентації. У зв'язку з цим у країнах Європейського Союзу та в Україні поступово формуються відповідні регуляторні рамки, які визначають вимоги до використання наноматеріалів у харчовій галузі.

Європейський Союз, який має один із найсуворіших підходів до харчової безпеки, запровадив комплексну систему оцінки ризиків нанотехнологій у харчових продуктах. Ключовим регламентом, що встановлює загальні принципи безпечності харчових продуктів, є Регламент (ЄС) № 178/2002. Він закладає основи оцінки ризиків, які має виконувати Європейський орган з безпечності харчових продуктів (EFSA), та визначає принципи відстежуваності та відповідальності виробників (Amenta et al., 2015). Застосування нанотехнологій у харчовій промисловості також регулюється Регламентом (ЄС) № 2015/2283, який стосується нових харчових продуктів і вимагає окремої процедури оцінки наноматеріалів перед їх використанням у продуктах харчування. Додатково

Регламент (ЄС) № 1169/2011 зобов'язує виробників маркувати продукти, що містять інгредієнти у формі наночастинок, для забезпечення поінформованості споживачів (Coles & Frewer, 2013).

Ці нормативні документи зобов'язують виробників проводити всебічну оцінку ризиків, пов'язаних із використанням наноматеріалів. Зокрема, відповідно до рекомендацій Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA), будь-які нові харчові продукти або інгредієнти, що містять наноматеріали, повинні проходити комплексну токсикологічну оцінку, включаючи дослідження біодоступності та можливого накопичення наночастинок в організмі людини (EFSA, 2021). Це особливо актуально у зв'язку з використанням пірогенного кремнезему та наночастинок ZnO у молочній промисловості для очищення та стабілізації сироваткових білків (Morel et al., 2009).

Щодо конкретних речовин, оксид цинку (ZnO) дозволено застосовувати як мікроелементну добавку (E6), що використовується для збагачення продуктів цинком, тоді як пірогенний кремнезем (E551) застосовується як антизлежувальний агент у порошкових продуктах (Singh & Kumar, 2023). Однак дослідження свідчать, що висока концентрація наночастинок ZnO може мати потенційні ризики для здоров'я через їхню здатність проникати у клітини та викликати окислювальний стрес (Sirelkhatim et al., 2015). У зв'язку з цим Європейський Союз підтримує подальші наукові дослідження, спрямовані на уточнення довгострокового впливу цих наноматеріалів на організм людини.

Для забезпечення безпечності наноматеріалів у харчовій промисловості Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) встановило суворі рекомендації щодо їхньої оцінки. Кожен новий харчовий інгредієнт, що містить наночастинок, підлягає ретельному аналізу щодо потенційних ризиків для здоров'я людини. Яскравим прикладом посилення регуляторного контролю стало рішення ЄС щодо діоксиду титану (Titanium

Dioxide, E171). У 2019 році після низки досліджень, які виявили потенційні канцерогенні ризики при споживанні E171, Європейська комісія ухвалила рішення про його повну заборону в харчових продуктах. Це стало прикладом того, як оновлені наукові дані можуть безпосередньо впливати на зміни у законодавстві та вимогах до безпеки харчових продуктів.

Окрім спеціалізованого регулювання харчових продуктів, нанотехнології також розглядаються в контексті загальних екологічних і соціальних ініціатив ЄС, спрямованих на зменшення впливу промисловості на довкілля та забезпечення сталого виробництва.

Одним із найважливіших документів, що визначає політику сталого розвитку в ЄС, є Європейська зелена угода (EU Green Deal), яка передбачає скорочення викидів парникових газів, оптимізацію використання природних ресурсів та перехід до циркулярної економіки (European Commission, 2019). У цьому контексті харчова промисловість повинна впроваджувати технології, які дозволяють скоротити кількість відходів та зменшити екологічний слід виробництва. Це може включати впровадження нанотехнологій для очищення стічних вод, переробки харчових відходів та покращення пакувальних матеріалів. Наприклад, компанія Nestlé, відповідно до принципів Green Deal, інвестувала понад 2 мільярди євро у розробку перероблюваного пакування на основі нанокompозитних матеріалів, що дозволило скоротити використання первинного пластику на 30 % (Nestlé, 2021).

Ще одним важливим документом, що формує рамки для застосування нанокompозитів у харчовій промисловості є директива Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), ухвалена у 2022 році. Дана директива зобов'язує великі підприємства звітувати про їхній вплив на довкілля, соціальну сферу та корпоративне управління (European Commission, 2022). Відповідно до цієї директиви, компанії, що застосовують наноматеріали у виробництві харчових продуктів, повинні

розробляти стратегії зменшення екологічних ризиків та запроваджувати прозорі системи контролю за використанням наночастинок у своїй продукції (Szczepaniak & Szajner, 2022). Невиконання цих вимог може призвести до штрафних санкцій, зниження довіри інвесторів та споживачів, а також обмеження доступу до фінансових ресурсів. У 2023 році компанія Unilever отримала штраф у розмірі 10 мільйонів євро за надання недостовірних даних щодо екологічного впливу своїх пакувальних матеріалів, що містили нанокompозити з оксидом цинку, використання яких не було належним чином задокументовано (Financial Times, 2023).

Важливу роль у регулюванні сталого виробництва відіграє Європейська таксономія (EU Taxonomy), яка встановлює критерії для визначення екологічно сталих видів діяльності (European Commission, 2021). Харчові компанії, які використовують екологічно безпечні технології, можуть отримувати податкові пільги та фінансову підтримку в межах екологічних програм ЄС. Наприклад, компанія Danone залучила 1,2 мільярда євро зеленого фінансування для розробки сталих харчових упаковок та технологій нанофільтрації для очищення стічних вод (Danone, 2022). З іншого боку, компанії, що не відповідають вимогам таксономії, ризикують втратити інвестиційну привабливість та доступ до екологічного фінансування.

Потенційні наслідки для компаній, які не дотримуються вимог екологічної безпеки та сталого розвитку, можуть бути дійсно значними. По-перше, штрафні санкції з боку регуляторних органів ЄС можуть сягати мільйонних сум, залежно від ступеня порушення та рівня екологічного впливу. Наприклад, у випадку порушення регламентів щодо безпеки харчових продуктів та впливу наноматеріалів на довкілля компанії можуть бути оштрафовані на суму до 4 % від їхнього річного обороту (European Parliament and Council, 2015).

По-друге, репутаційні ризики можуть значно вплинути на позиції компанії на ринку. В сучасних умовах споживачі все більше звертають увагу на екологічну відповідальність виробників, а тому порушення стандартів може призвести до втрати лояльності клієнтів та скорочення обсягів продажів (Christenson & Claesson, 2001). Крім того, компанії, що не відповідають стандартам Green Deal, можуть зіштовхнутися з труднощами при виході на європейські ринки, оскільки все більше ритейлерів вводять жорсткі вимоги до екологічності продукції. Як приклад, у 2022 році британська мережа супермаркетів Tesco відмовилася від постачальників, які не змогли підтвердити екологічну безпеку своєї продукції, що містила наночастинки для продовження терміну зберігання товарів (BBC, 2022).

По-третє, компанії можуть втратити доступ до фінансування. Банки та інвестори все частіше орієнтуються на принципи ESG (Environmental, Social, Governance), що означає, що екологічно відповідальні компанії мають більше шансів на отримання кредитів та інвестицій (European Commission, 2022). Наприклад, французький виробник органічних продуктів Bonduelle у 2023 році залучив 200 мільйонів євро інвестицій завдяки впровадженню екологічно безпечних технологій у виробництві (Bonduelle, 2023). Натомість підприємства, що не дотримуються екологічних стандартів, можуть зіткнутися зі зростанням вартості кредитування та втратою фінансових можливостей для розвитку.

У межах загальної екологічної стратегії ЄС важливе місце посідає концепція сталого виробництва та циркулярної економіки, яка передбачає мінімізацію відходів і раціональне використання ресурсів. Використання нанотехнологій може сприяти реалізації цієї концепції за рахунок покращення екологічних характеристик харчових продуктів та пакування, а також оптимізації виробничих процесів. Наприклад, наноматеріали можуть використовуватися для створення біорозкладних пакувальних матеріалів, що подовжують термін зберігання продуктів та зменшують кількість

харчових відходів (Saffarionpour, 2019). Крім того, нанотехнології можуть сприяти очищенню стічних вод і переробці відходів харчової промисловості, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Таким чином, впровадження екологічно безпечних технологій та дотримання вимог сталого розвитку не є просто рекомендацією, а стає необхідністю для компаній, які прагнуть успішно працювати на ринку ЄС. Харчова промисловість, зокрема компанії, що застосовують нанотехнології у виробництві, повинні адаптувати свої бізнес-моделі до нових екологічних реалій, інакше вони ризикують втратити конкурентні позиції, довіру споживачів та фінансову стабільність.

5.2 Вимоги українського законодавства щодо екологічної безпеки та сталого виробництва харчової промисловості

Метою даного підрозділу є дослідження українського законодавства щодо застосування нанокompatитів у харчовій промисловості відносно екологічної безпеки та принципів сталого розвитку.

Застосування нанокompatитів у харчовій промисловості потребує не лише технологічного обґрунтування, а й відповідності екологічним стандартам. В Україні система екологічного регулювання у сфері харчової промисловості формується на основі національного законодавства, міжнародних зобов'язань та стандартів Європейського Союзу.

5.2.1 Загальні принципи екологічного регулювання в Україні

Екологічне регулювання у сфері харчової промисловості в Україні ґрунтується на низці нормативно-правових актів, що регламентують раціональне використання природних ресурсів, поводження з відходами, екологічний моніторинг та впровадження принципів сталого виробництва.

Зважаючи на те, що молочна промисловість є одним із ключових секторів агропромислового комплексу, а її побічний продукт — сироватка молочна часто не переробляється належним чином, законодавче

регулювання відіграє критично важливу роль у мінімізації негативного впливу на довкілля.

Одним із ключових законодавчих актів, що визначає загальні принципи екологічного регулювання, є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (1991). Він закріплює основні екологічні права та обов'язки громадян, визначає вимоги до екологічної безпеки промислових об'єктів, механізми державного контролю та відповідальність за порушення норм природоохоронного законодавства (Верховна Рада України, 1991).

Важливу роль у державній екологічній політиці відіграє Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (2019). Документ передбачає перехід до циркулярної економіки, впровадження екологічних стандартів, стимулювання екологічних інновацій та створення ефективної системи моніторингу забруднення довкілля (Верховна Рада України, 2019). Це особливо важливо для молочної промисловості, оскільки неконтрольоване скидання молочної сироватки у водойми призводить до евтрофікації, що є порушенням екологічних норм.

Ще одним важливим нормативним актом є Закон України «Про відходи» (1998), який визначає принципи поводження з відходами виробництва, передбачає відповідальність за порушення екологічних норм та вимагає впровадження технологій переробки та утилізації органічних відходів (Верховна Рада України, 1998). Відповідно до цього закону, підприємства харчової промисловості повинні забезпечити утилізацію або переробку побічних продуктів таким чином, щоб мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Контроль за безпечністю продуктів харчування, включно з питаннями екологічної безпеки виробництва, регулюється Законом України «Про безпечність та якість харчових продуктів» (1997, оновлений 2021 року). Він

встановлює вимоги до якості сировини, технологій її обробки та заходів контролю безпеки продукції (Верховна Рада України, 1997).

З метою впровадження принципів сталого виробництва в Україні діє Національна стратегія поводження з відходами, яка спрямована на зменшення промислового навантаження на довкілля та розвиток екологічно безпечних технологій. Ця стратегія передбачає впровадження принципів розширеної відповідальності виробників, що може стосуватися і молокопереробних підприємств, які повинні шукати екологічно безпечні рішення для утилізації молочної сироватки (Міндовкілля України, 2020).

У межах процесу євроінтеграції Україна поступово адаптує своє екологічне законодавство до стандартів Європейського Союзу. Відповідно до положень Угоди про асоціацію з ЄС, українські підприємства, що працюють у сфері харчової промисловості, повинні поступово впроваджувати стандарти екологічної безпеки, аналогічні Регламенту (EU) № 2015/2283 щодо нових харчових продуктів та Регламенту (EC) № 1935/2004 щодо матеріалів, що контактують із продуктами харчування (European Parliament and Council, 2004, 2015).

Таким чином, екологічне регулювання молочної промисловості в Україні базується на загальних принципах сталого розвитку, державного контролю за забрудненням довкілля та адаптації до стандартів ЄС. Впровадження нових технологій очищення та утилізації, зокрема із використанням нанокompозитних матеріалів, може значно покращити екологічну ситуацію в країні. Проте для ефективної імплементації таких рішень необхідні конкретні законодавчі ініціативи щодо утилізації органічних відходів у харчовій промисловості.

5.2.2 Регулювання використання наноматеріалів у харчовій промисловості

Використання нанотехнологій у харчовій промисловості відкриває нові можливості для підвищення якості продуктів, покращення їхніх функціональних властивостей та продовження терміну зберігання. Однак, водночас, існує необхідність у чіткому законодавчому регулюванні, оскільки деякі наноматеріали можуть мати потенційні ризики для здоров'я людини та довкілля. У Європейському Союзі та США такі матеріали вже підлягають суворій екологічній оцінці та контролю, а в Україні їхнє правове регулювання досі перебуває на початковій стадії.

Наразі в Україні відсутній окремий закон, що регулює використання наноматеріалів у харчовій промисловості. Відсутність чітко визначеного правового статусу наноматеріалів ускладнює їхню правову ідентифікацію, оцінку безпеки та ліцензування. Водночас використання нанотехнологій у виробництві харчових продуктів частково підпадає під дію таких нормативних документів:

- Закон України «Про безпечність та якість харчових продуктів» (1997, оновлений 2021 року). Він встановлює загальні вимоги до харчових продуктів, проте не містить конкретних положень щодо нанотехнологій (Верховна Рада України, 1997).
- Державні санітарні норми та стандарти. Використання харчових добавок та допоміжних технологічних речовин у виробництві підпадає під дію гігієнічних вимог щодо безпечності та якості харчових продуктів, проте спеціальні вимоги до наночастинок відсутні (Міністерство охорони здоров'я України, 2013).
- Впровадження систем контролю безпеки (НАССР, ISO 22000). Харчові підприємства зобов'язані застосовувати систему аналізу небезпечних факторів та контролю критичних точок (НАССР), що включає контроль за використанням нових матеріалів у виробництві (ISO, 2018).

Відсутність чітких норм щодо оцінки безпеки наноматеріалів у харчових продуктах створює правові ризики, оскільки підприємства не мають чітких критеріїв для визначення дозволених технологій.

З точки зору екологічної оцінки та ліцензування наноматеріалів варто зазначити, що на поточний час спеціального законодавства щодо екологічної оцінки наноматеріалів в Україні поки немає, але загальні екологічні вимоги містяться у наступних документах:

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (1991). Цей документ передбачає, що нові технології та речовини, які можуть впливати на стан довкілля, повинні проходити обов'язкову екологічну експертизу (Верховна Рада України, 1991).
- Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (2017). Цей документ вимагає аналізу ризиків перед впровадженням нових технологій, проте прямо не визначає вимог до наноматеріалів (Верховна Рада України, 2017).

З огляду на європейську практику, наноматеріали, які використовуються в харчовій промисловості, повинні проходити аналіз біодеградації та впливу на довкілля. Це необхідно для оцінки можливого накопичення наночастинок у водних системах та ґрунтах. Наприклад, наночастинки ZnO можуть вивільняти іони цинку, які потенційно токсичні для водних організмів (Sarvi et al., 2014).

Також існує ризик переходу наночастинок у харчовий ланцюг. Відсутність методик для оцінки впливу наночастинок на організм людини є суттєвим бар'єром для їхнього широкого застосування (EFSA, 2021).

Попри потенціал нанотехнологій, необхідна система ліцензування та реєстрації, яка б передбачала контроль за виробництвом, розповсюдженням та використанням наноматеріалів у харчовій промисловості.

На сучасному етапі існує низка проблем, що гальмують ефективне регулювання нанотехнологій у харчовій промисловості України. Однією з ключових є відсутність спеціалізованого реєстру дозволених наноматеріалів. У країнах ЄС діє Регламент (EU) № 2015/2283, який зобов'язує виробників чітко маркувати наноматеріали у складі харчових продуктів, забезпечуючи прозорість для споживачів і контроль за безпекою таких технологій (European Parliament and Council, 2015). В Україні аналогічний реєстр поки що не створений, що ускладнює процес регулювання та обмежує можливості для запровадження інновацій у харчовій промисловості.

Ще однією важливою проблемою є недостатня кількість наукових досліджень щодо впливу наночастинок на здоров'я людини та довкілля. Відсутність масштабних клінічних і екологічних випробувань унеможлиблює всебічну оцінку ризиків і користі використання нанотехнологій у харчових продуктах. Це також впливає на розробку законодавчих норм, оскільки без належної доказової бази складно встановити чіткі вимоги до їхнього використання.

Крім того, гармонізація законодавства України з європейськими вимогами залишається викликом, який потребує комплексного підходу. Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) встановлює жорсткі вимоги щодо використання нанотехнологій, застосовуючи ризик-орієнтований підхід до оцінки їхньої безпеки (EFSA, 2021). Україні необхідно адаптувати своє законодавство до норм ЄС, що забезпечить відповідність міжнародним стандартам і дозволить національним виробникам виходити на глобальні ринки. Впровадження чітких регуляторних механізмів не лише сприятиме зменшенню екологічних ризиків, а й створить умови для розвитку високотехнологічного виробництва у сфері харчової промисловості.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ V

Використання нанокомпозитів у харчовій промисловості є важливим інструментом для покращення технологічних процесів, підвищення ефективності виробництва та забезпечення екологічної безпеки. Однак їх застосування пов'язане із значними соціальними та екологічними викликами, які потребують відповідного регулювання, контролю та науково обґрунтованих підходів.

Європейський Союз надає особливого значення питанням сталого розвитку та екологічної безпеки у харчовій промисловості. Вимоги, встановлені Green Deal, CSRD та EU Taxonomy, зобов'язують підприємства впроваджувати новітні екологічно безпечні технології, зокрема використання наноматеріалів у виробництві продуктів харчування.

Важливу роль у регулюванні відіграє Регламент (EU) № 2015/2283, що встановлює жорсткі вимоги до використання наноматеріалів, та Регламент (EC) № 1935/2004, який контролює матеріали, що контактують із харчовими продуктами. Невиконання цих стандартів може призвести до фінансових санкцій, репутаційних ризиків та обмеження доступу на європейський ринок.

В Україні регулювання екологічної безпеки харчової промисловості ґрунтується на загальних нормативно-правових актах, таких як Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" (1991), Закон України "Про відходи" (1998), Закон України "Про безпечність та якість харчових продуктів" (1997, оновлений 2021 року). Проте відсутність спеціалізованого законодавства щодо застосування нанокомпозитів у харчовій промисловості створює ризики як для виробників, так і для споживачів. Зокрема, відсутність спеціального реєстру дозволених наноматеріалів ускладнює їхню правову ідентифікацію та контроль безпеки.

Проблема утилізації молочної сироватки залишається одним із ключових екологічних викликів харчової промисловості. Використання нанокompatитних матеріалів, таких як пірогенний кремнезем та наночастинки ZnO, є перспективним напрямком для очищення та стабілізації сироваткових білків. Проте їх вплив на довкілля потребує додаткових досліджень, зокрема щодо біодеградації та потенційної токсичності для водних екосистем.

Екологічна оцінка харчової промисловості передбачає впровадження екологічного аудиту, оцінки життєвого циклу продукції (LCA) та міжнародних стандартів ISO 14001 та ISO 22000. Українські підприємства повинні адаптуватися до європейських норм, що сприятиме підвищенню їхньої конкурентоспроможності та експортного потенціалу.

Загалом, впровадження нанокompatитів у харчову промисловість може мати позитивний ефект для економіки, технологічного розвитку та екології. Проте для ефективного використання цих технологій необхідно вдосконалити законодавче регулювання, запровадити обов'язковий екологічний моніторинг та адаптувати українські стандарти до вимог EFSA та ЄС. Це дозволить створити умови для сталого розвитку харчової промисловості, мінімізувати негативний вплив на довкілля та забезпечити високий рівень безпеки продукції для споживачів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена науковому обґрунтуванню та експериментальному підтвердженню доцільності застосування наночастинок пірогенного кремнезему (SiO_2) та оксиду цинку (ZnO) у технологіях харчових продуктів на основі сироватки молочної. У ході досліджень було вивчено вплив зазначених наноматеріалів на функціонально-технологічні властивості сироватки молочної, ефективність адсорбції білкових компонентів, показники ферментації, якість готових кисломолочних і хлібобулочних харчових продуктів, а також питання біобезпеки наночастинок у харчовій промисловості. На підставі комплексного аналізу отриманих результатів сформульовано такі висновки:

Встановлено, що пірогенний кремнезем (SiO_2) є високоефективним адсорбентом білків молочної сироватки: за оптимальних параметрів, а саме : додавання 1,5 % гідрофільного кремнезему при температурі сироватки молочної 45 °С та інтенсивному перемішуванні протягом 40 хв. відбувається видалення 50–55 % білкових компонентів сироватки молочної.

Ультразвукове диспергування суспензії кремнезему сприяло руйнуванню агломератів його частинок і значно інтенсифікувало процес адсорбції білкових молекул, що підвищувало швидкість та ефективність видалення білків із сироватки молочної.

Встановлено відсутність вираженої селективності адсорбції кремнеземом щодо основних фракцій сироваткових білків: ступінь вилучення β -лактоглобуліну, α -лактальбуміну, лактоферину й сироваткового альбуміну становить 65–71 % незалежно від їхньої молекулярної маси.

Доведено антизлежувальні властивості пірогенного кремнезему: введення 1 % адсорбенту до сухої молочної сироватки знижувало ступінь її злежування до <8 %. Крім того, кремнезем ефективно сорбував радіонуклід

^{137}Cs (до 34,6 % у рідкому середовищі), що відкриває перспективи його застосування для радіаційного очищення продуктів.

Показано, що введення наночастинок ZnO у процес ферментації молочної сироватки прискорює розвиток молочнокислих бактерій: підвищуються електропровідність і окисно-відновний потенціал середовища, а час ферментації досягнення заданої кислотності (150 °T) скорочується майже вдвічі (з ≈ 32 до ≈ 17 год) порівняно з контролем.

Експериментально доведено ефективність використання збагаченої ZnO сироватки молочної у виробництві кисломолочного м'якого сиру виготовленого термокислотним способом: запропоновано використовувати її як натуральний функціональний інгредієнт, що забезпечує необхідні органолептичні та технологічні показники кінцевого продукту.

Встановлено, що додавання збагаченої ZnO концентрованої сироватки до житньо-пшеничного тіста активізує бродильні процеси і призводить до поліпшення якості хліба: питомий об'єм буханця збільшується на понад 11 %, покращуються формостійкість і структура м'якушки. Застосування такої сироватки також уповільнює процес черствіння: через 72 год ступінь черствіння хліба з нею був на 26–31 % нижчим, ніж у контрольного зразка.

Проведено комплексну оцінку безпечності запропонованих технологічних рішень: діоксид кремнію (E551) дозволений як харчова добавка-антизлежувач (до 1 %) і вважається безпечним у рекомендованих концентраціях, тоді як для наноформи оксиду цинку нормативи не встановлені. Токсикологічні дослідження *in vitro* показали, що високі концентрації наночастинок ZnO викликають цитотоксичні ефекти, проте концентрації, які збагачують продукт цинком на 10–20 % добової потреби, не спричиняють виражених негативних ефектів.

Отримані результати досліджень були апробовані на підприємстві ТОВ "Галіївський маслозавод", а також використані під час розробки

дослідних партій кисломолочного сиру та житньо-пшеничного хліба з додаванням сироватки, збагаченої наночастинками оксиду цинку. Впровадження результатів у навчальний процес здійснено на базі кафедри технології молока і молочних продуктів Національного університету харчових технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Антомонов, М. Ю. (2017). Математична обробка та аналіз медико-біологічних даних (2-ге вид.). Київ.

Верховна Рада України. (1991). Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>

Верховна Рада України. (1997). Закон України «Про безпечність та якість харчових продуктів». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр>

Верховна Рада України. (1998). Закон України «Про відходи». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр>

Верховна Рада України. (2017). Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII. Відомості Верховної Ради України, 2017, № 29, ст. 315.

Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>

Верховна Рада України. (2019). Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19>

Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2022). Вплив пірогенного кремнезему на стабільність сироватки молочної сухої під час зберігання. Наукові праці НУХТ, 28(5), 158–167.

Висоцький, О., & Кочубей-Литвиненко, О. (2024). Перспективи використання сироватки молочної освітленої пірогенним кремнеземом у якості ко-субстрату для виробництва біогазу. У матеріалах Всеукраїнської науково-практичної конференції «Молочна промисловість від виробника до споживача: сучасні тренди та орієнтири», 29 травня 2024 р., Київ.

ГОСТ 30538-97. (2000). Продукти харчові. Методика визначення токсичних елементів атомно-емісійним методом. Прийнято Держстандартом України №12 від 21.11.97.

Грегірчак, Н. М., & Антонюк, М. М. (2011). Імобілізовані ферменти і клітини в біотехнології. Конспект лекцій.

Державна служба статистики України. (2021). Статистичні дані надходження молока на переробні підприємства у 2021 році. Державна служба статистики України. <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Дата звернення: 03.01.2024).

Державна служба статистики України. (2024). Статистичні дані виробництва промислової продукції за видами за 2020 і 2021 роки. Державна служба статистики України. <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Дата звернення: 10.06.2024).

Дмитруха, Н. М., Луговський, С. П., & Лагутіна, О. С. (2015). Токсичний ефект наночастинок оксиду заліза на перитонеальні макрофаги щурів. Український журнал з проблем медицини праці, (3), 28–33.

Дмитруха, Н.М., Лагутіна, О.С., Громовий, Т.Ю., & Пилипчук, Є.В. (2021). Дослідження безпечності нанопрепаратів заліза і міді за їхнім впливом на білки плазми крові людини в умовах *in vitro*. Український журнал з проблем медицини праці, 17(3), 139-150.

Дубівко, А. С., Кочубей-Литвиненко, О. В., Чернюшок, О. А., & Пушанко, Н. М. (2022). Перспективи використання колоїдного розчину цинку при пророщуванні зерна голозерного вівса. Наукові праці Національного університету харчових технологій, (28, № 1), 187-198.

Жильцов, А. В., Коробський, В. В., Лапшин, С. О., & Олішевський, В. В. (2017). Використання електротехнічного комплексу для отримання нано- і мікропорошків металів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (268), 189–196.

Іванов, С. В., Пасічний, В. М., Страшинський, І. М., & Фурсік, О. П. (2014). Вплив нанокompозиту на функціональні показники білкових препаратів рослинного походження. Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. Збірник наукових праць, (2 (112)), 74–78.

Карпугіна, М. В., Романова, З. М., Сидор, В. М., & Карпугіна, Д. Д. (2012). Сучасні способи активації процесів розмноження та ферментування пивоварних дріжджів. Обладнання та технології харчових виробництв, 28, 125–130.

Кочубей-Литвиненко, О. В. (2021). Наукове обґрунтування електрофізичних способів оброблення молочної сироватки та їх використання в технологіях молочних продуктів (Автореферат дисертації доктора технічних наук, Національний університет харчових технологій). Київ.

Кочубей-Литвиненко, О. В. (2021). Наукове обґрунтування електрофізичних способів оброблення молочної сироватки та їх використання в технологіях молочних продуктів (Дисертація доктора технічних наук). Національний університет харчових технологій.

Кочубей-Литвиненко, О. В., & Лопатько, К. Г. (2021). Нанобіотехнологічні основи спрямованого збагачення молочної сироватки мінеральними елементами. Наукові праці НУХТ, 5, 134–148.

Кочубей-Литвиненко, О.В., Пухляк, А.Г., & Щербатюк, О.Г. (2023). Вплив електроіскрового оброблення сироватки молочної на інтенсивність її ферментування. Наукові праці НУХТ, 29(3), 159-167.

Кошова, В. М., Яжло, В. С., Каплуненко, В. Г., & Огородник, Ю. І. (2015). Підвищення бродильної активності пивоварних дріжджів за допомогою наноаквахелату цинку. Східно-європейський журнал передових технологій, 10(76), 40–44.

Лопатько, К. Г. (2015). Обґрунтування фізико-технологічних основ біологічної функціональності наночастинок металів: автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, спеціальність 03.00.20 «Біотехнологія». Київ: Національний університет біоресурсів та природокористування України.

Лопатько, К. Г., Афтандіянц, Є. Г., Зазимко, О. В., & Трач, В. В. (2016). Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів: монографія. Київ: Вид-во НУБіП України.

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2020). Національна стратегія поводження з відходами. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/>

Міністерство охорони здоров'я України. (2013). Наказ № 1130 від 19.12.2013 «Про затвердження Гігієнічних вимог щодо безпечності та якості харчових продуктів». Офіційний вісник України.

Нанотехнології у фармації та медицині: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції з міжнародною участю (19–20 квітня 2018 р., м. Харків). (2018). Харків: Національний фармацевтичний університет. 117 с.

Олішевський, В. В., Маринін, А. І., Дашковський, Ю. О., Ткаченко, С. В., & Щербаков, О. Б. (2011). Антимікробний вплив препаратів наночастинок металів на мікрофлору харчових продуктів. *Ukrainica Bioorganica Acta*, 2011(1), 46–52.

Олішевський, В. В., Українець, А. І., Лопатько, К. Г., та ін. (2016). Досвід використання нанокompозиту алюмінію в умовах бурякоцукрового виробництва. *Цукор України*, 11-12(131-132), 11–16.

Пасічний, В. М., & Геречук, А. М. (2015). Використання високодисперсного кремнезему в технології м'ясомістких продуктів оздоровчого спрямування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, (4), 124-129.

Патон, Б., Москаленко, В., Чекман, І., & Мовчан, Б. (2009). Нанонаука і нанотехнології: технічний, медичний та соціальний аспекти. Вісник НАН України, 2009(6), 18–26.

Пирог, Т. П. (2010). Загальна мікробіологія. Київ: НУХТ.

Поліщук, О. (2023). Незакінчена п'єса про Чорнобиль як склянка парного молока. Укрінформ. Retrieved October 10, 2023, from <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/>

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника. (н.д.). Лекція 10. Отримано з <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F-10.pdf>

Регламент Європейського парламенту та Ради ЄС № 1333/2008 від 16 грудня 2008 року про харчові добавки.

Ткаченко, С. В. (2014). Підвищення ефективності очищення дифузійного соку з використанням гідроксиду алюмінію в нанорозмірному стані (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук). Національний університет харчових технологій, Київ.

Трахтенберг, І. М., & Дмитруха, Н.М. (2013). Наночастинки металів, методи отримання, сфери застосування, фізико-хімічні та токсичні властивості. Український журнал з проблем медицини праці, 4(37), 62–74.

Українець, А. І., Олішевський, В. В., Пушанко, Н. М., Ляпіна, К. В., & Маринін, А. І. (2015). Коагуляційне очищення жомпресової води гелем алюмінію. Наукові праці НУХТ, 21(5), 237–243

Фурсік, О. П., Страшинський, І., & Маринін, А. (2019). Використання нанотехнологій в харчовій промисловості. У Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: 85 Ювілейна Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів (Ч. 1, с. 354). Київ: НУХТ.

Хоменко, І. М., Олішевський, В. В., Кочубей-Литвиненко, О. В., Маринін, А. І., & Білоник, А. Б. (2014). Гігієнічна оцінка використання нанорозмірних систем для дезактивації радіаційно забруднених продуктів харчування у віддалений період після Чорнобильської катастрофи. *Сімейна медицина*, 5, 35-37.

Чекман, І. С., Ульберг, З. Р., & Руденко, А. Д. (2013). Цинк і наноцинк: властивості, застосування у клінічній практиці. *Український медичний часопис*, 2(94), Т. III/IV, 42–47.

Яценюк, Т. В., Семенова, О. І., & Решетняк, Л. Р. (2017). Утилізація молочної сироватки. Інноваційний розвиток харчової індустрії: V міжнародна науково-практична конференція, 14 грудня 2017 р.: тези доповіді, 125–128.

Abobatta, W. F. (2018). Nanotechnology application in agriculture. *Acta Scientific Agriculture*, 2(6), 99–102.

Afzaal, M. et al. (2022). Anticaking Agents in Food Nanotechnology. In: Egbuna, C., Jeevanandam, J., C. Patrick-Iwuanyanwu, K., N. Onyeike, E. (eds) *Application of Nanotechnology in Food Science, Processing and Packaging*. Springer, Cham. Взято з: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98820-3_9

Al-Mashikhi, S., & Li-Chan, E. (1988). Separation of immunoglobulins and lactoferrin from cheese whey by chelating chromatography. *Journal of Dairy Science*, 71(7), 1747–1755. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79740-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79740-4)

Amenta, V., Aschberger, K., Arena, M., Bouwmeester, H., Moniz, F. B., Brandhoff, P., & Gottardo, S. (2015). Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 463-476. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.07.011>

Arabmofrad, S., Bagheri, M., Rajabi, H., & Jafari, S. (2020). Nanoadsorbents and nanoporous materials for the food industry. , 107-159. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815866-1.00004-2>.

Bai, Y. X., Li, Y. F., Yang, Y., & Yi, L. X. (2006). Covalent immobilization of triacylglycerol lipase onto functionalized nanoscale SiO₂ spheres. *Process Biochemistry*, 41(4), 770–777.

<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.09.012>

Batista, G., Silva, M., Gomes, W., Neves, I., Mól, P., Resende, J., Veríssimo, L., & Soares, J. (2019). Preparation of mesoporous activated carbon from defective coffee beans for adsorption of fresh whey proteins. *Acta Scientiarum-technology*, 42. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v42i1.45914>

BBC. (2022). Tesco drops suppliers failing to meet environmental standards. Retrieved from <https://www.bbc.com/>

Birch, R. M., Ciani, M., & Walker, G. M. (2003). Magnesium, calcium and fermentative metabolism in wine yeasts. *Journal of Wine Research*, 14(1), 3–15.

Biswas, R., Alam, M., Sarkar, A., Haque, M. I., Hasan, M. M., & Hoque, M. (2022). Application of nanotechnology in food: Processing, preservation, packaging and safety assessment. *Heliyon*, 8(12), e11795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11795>

Bonduelle. (2023). Sustainability Report 2023. Retrieved from <https://www.bonduelle.com/>

Catalano, F., Alberto, G., Ivanchenko, P., Dovbeshko, G., & Martra, G. (2015). Effect of Silica Surface Properties on the Formation of Multilayer or Submonolayer Protein Hard Corona: Albumin Adsorption on Pyrolytic and Colloidal SiO₂ Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, 119, 26493–26505. <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.5B07764>

Chasapis, C. T., Loutsidou, A. C., Spiliopoulou, C. A., et al. (2012). Zinc and human health: An update. *Archives of Toxicology*, 86, 521–534. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0775-1>

Christenson, H., & Claesson, P. (2001). Direct Measurements of the Force between Hydrophobic Surfaces in Water. *Advances in Colloid and Interface Science*, 91, 391–436. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00036-1)

Chuyko, A. A., Gorlov, Yu. I., & Lobanov, V. V. (2006). Structure and chemistry of silica surface (P. P. Gorbik, Ed.). Kyiv: Naukova Dumka

Chuyko, A. A., Tertykh, V. A., Lobanov, V. V., et al. (2003). Medical chemistry and clinical application of silicon dioxide (A. A. Chuyko, Ed.). Kyiv: Naukova Dumka

Coles, D., & Frewer, L. J. (2013). Nanotechnology applied to European food production – A review of ethical and regulatory issues. *Trends in Food Science & Technology*, 34(1), 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.006>

Danone. (2022). Green financing for sustainable food packaging. Retrieved from <https://www.danone.com/>

Dmitrukha, N. N. (2013). Kultura kletok kak in vitro model' v toksikologicheskikh issledovaniyakh. *Mediks – Antieydzhing*, 3(33), 50–55.

Donnet, J., Balard, H., Nedjari, N., Hamdi, B., Barthel, H., & Gottschalk-Gaudig, T. (2008). Influence of specific surface area of pyrogenic silicas on their heat of immersion in water and on their surface properties assessed using inverse gas chromatography.. *Journal of colloid and interface science*, 328 1, 15-9 . <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.005>

Doyle, M. E. (2006). Nanotechnology: A brief literature review. Food Research Institute Briefings, University of Wisconsin–Madison. Retrieved from https://fri.wisc.edu/files/Briefs_File/FRIBrief_Nanotech_Lit_Rev.pdf

Drobot, V. I. (2002). Технологія хлібопекарського виробництва. Київ: Логос.

EFSA. (2021). Guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. *EFSA Journal*, 19(3), e06584.

Egger, S., Lehmann, R. P., Height, M. J., Loessner, M. J., & Schuppler, M. (2009). Antimicrobial properties of a novel silver-silica nanocomposite material. *Applied and Environmental Microbiology*, 75, 2973–2976. <https://doi.org/10.1128/AEM.01658-08>

El-Hatmi, H., Jrad, Z., Salhi, I., Aguib, A., Nadri, A., & Khorchani, T. (2015). Comparison of composition and whey protein fractions of human, camel, donkey, goat and cow milk. *Mljekarstvo*, 65(3), 159-167. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2015.0302>

Elnashaie, S., Danafar, F., & Hashemipour, H. (2018). *Nanotechnology for chemical engineers*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-496-2>

Ettliger, M., Ladwig, T., & Weise, A. (2000). Surface modified fumed silicas for modern coatings. *Progress in Organic Coatings*, 40, 31-34. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(00\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00151-X)

European Commission. (2019). The European Green Deal. Retrieved from <https://ec.europa.eu/>

European Commission. (2021). EU Taxonomy Regulation 2021/2139. Official Journal of the European Union.

European Commission. (2022). Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Retrieved from <https://ec.europa.eu/>

European Food Safety Authority (EFSA). (2016). Safety assessment of the substance zinc oxide, nanoparticles, for use in food contact materials. *EFSA Journal*, 14(3). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4408>

European Parliament and Council. (2004). Regulation (EC) No 1935/2004 on materials and articles intended to come into contact with food. Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council. (2008). Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures (CLP Regulation). Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council. (2008). Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives. Official Journal of the European Union, L 354, 16-33. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/1333/2018-10-29/eng>

European Parliament and Council. (2015). Regulation (EU) No 2015/2283 on novel foods. Official Journal of the European Union.

Financial Times. (2023). Unilever fined for misleading sustainability claims. Retrieved from <https://www.ft.com/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. (2010). FAO/WHO Expert Meeting on the Application of Nanotechnologies in the Food and Agriculture Sectors: Potential Food Safety Implications. FAO. <https://www.fao.org/4/i1434e/i1434e00.pdf>

Fu, P. P., Xia, Q., Hwang, H. M., Ray, P. C., & Yu, H. (2014). Mechanisms of nanotoxicity: Generation of reactive oxygen species. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22(1), 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.005>

Fukui, H., Horie, M., Endoh, S., Kato, H., Fujita, K., Nishio, K., Komaba, L. K., Maru, J., Miyauhi, A., Nakamura, A., Kinugasa, S., Yoshida, Y., Hagihara, Y., & Iwahashi, H. (2012). Association of zinc ion release and oxidative stress induced by intratracheal instillation of ZnO nanoparticles to rat lung. *Chemico-Biological Interactions*, 198(1–3), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2012.04.007>

Gao, M., Liu, Q., Xue, Y., Li, B., & Zou, X. (2022). Facile synthesis of peanut-like Sn-doped silica nano-adsorbent for affinity separation of proteins. *RSC Advances*, 12, 4697-4702. <https://doi.org/10.1039/d1ra08362g>

Gigli, I. (Ed.). (2016). Milk protein – From structure to biological properties and health aspects. Intech.

González-Weller, D., Paz-Montelongo, S., Bethencourt-Barbuzano, E., Niebla-Canelo, D., Alejandro-Vega, S., Gutiérrez, Á. J., Hardisson, A., Carrascosa, C., & Rubio, C. (2023). Proteins and minerals in whey protein supplements. *Foods*, 12(11), 2238. <https://doi.org/10.3390/foods12112238>

Guyomard, H., Soler, L. G., Détang-Dessendre, C., & Forslund, A. (2023). The European Green Deal improves the sustainability of food systems but has

uneven economic impacts on consumers and farmers. *Communications Earth & Environment*, 4, 294. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01019-6>

Hamad, A. F., Han, J.-H., Kim, B.-C., & Rather, I. A. (2018). The intertwine of nanotechnology with the food industry. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(1), 27–30. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.09.004>

Handford, C., Dean, M., Henchion, M., Spence, M., Elliott, C., & Campbell, K. (2014). Implications of nanotechnology for the agri-food industry: Opportunities, benefits and risks. *Trends in Food Science and Technology*, 40, 226-241. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.09.007>

He, X., & Hwang, H.-M. (2016). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(4), 671–681. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.06.001>

Heade, J., McCartney, F., Chenlo, M., Marro, O., & Severic, M. (2021). Synthesis and in vivo evaluation of insulin-loaded whey beads as an oral peptide delivery system. *Pharmaceutics*, 13(8), 1205. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081205>

Hussain, C. M., & Mishra, A. K. (Eds.). (2018). *Nanotechnology in environmental science*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527808854>

ICCVAM. (2001). Report of the International Workshop on In Vitro Methods for Assessing Acute Systemic Toxicity. ICCVAM-NICEATM Workshop, Arlington, VA, USA. NIH Publication No. 01-4499

ISO. (2018). ISO 22000:2018. Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain. International Organization for Standardization.

Jiang, J. (2018). The advancing of zinc oxide nanoparticles for biomedical applications. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, Article ID 1062562. <https://doi.org/10.1155/2018/1062562>

Karel, M., & Lund, D. B. (2003). *Physical principles of food preservation* (2nd ed., revised and expanded). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203911792>

Karimi-Dehkordi, M., Karam pour, H., Peighambarzadeh, S. Z., & Gholami-Ahangaran, M. (2024). Comparative evaluation of protein values and electrophoretic patterns of buffalo milk and cow milk proteins by the SDS-PAGE method. *Research on Animal Production*, 15(2), 131-139. <https://doi.org/10.61186/rap.15.2.131>

Karputina M.V., Romanova Z.M., Sydor V.M., Karputina D.D. Suchasni sposoby aktyvatsii protsesiv rozmnozhennia ta fermentatsii pyvovarnykh drizhdzhiv. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv*, 2012, 28, pp. 125-130.

Kaul, S., Gulati, N., Verma, D., Mukherjee, S., & Nagaich, U. (2018). Role of nanotechnology in cosmeceuticals: A review of recent advances. *Journal of Pharmaceutics*, 2018, 19 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/3420204>

Kharazian, B., Hadipour, N. L., & Ejtehadi, M. R. (2016). Understanding the nanoparticle-protein corona complexes using computational and experimental methods. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 75, 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2016.02.008>

Kilcast, D. & Subramaniam, P. (2000) *The Stability and Shelf-Life of Food*. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Boca Raton, Washington DC.

Kim, M.-K., Lee, J.-A., Jo, M.-R., Kim, M.-K., Kim, H.-M., Oh, J.-M., & Choi, S.-J. (2015). Cytotoxicity, uptake behaviors, and oral absorption of food-grade calcium carbonate nanomaterials. *Nanomaterials*, 5(4), 1938–1954. <https://doi.org/10.3390/nano5041938>

Kochubei-Lytvynenko, O., Chernyushok, O., Bilyk, O., & Bondarenko, Yu. (2019). Studying the effect of electrospray treatment of milk whey on the

process of its fermentation and quality of thermoacid cheese. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/11(102), 33–40.

Kochubei-Lytvynenko, O., Mykhailyk, V., & Ukrainets, A. (2016). The use of glass transition temperature in forecasting of whey powder storage stability, obtained with the use of electro-spark treatment. *Food and Environment Safety*, 15(1), 76–83. Retrieved from <https://fens.usv.ro/index.php/FENS/article/view/206>

Koshova V.M., Yazhlo V.S., Kaplunenko V.H., Ohorodnyk Yu.I. Pidvyshchennia brodylnoyi aktyvnosti pyvovarnykh drizhdzhiv za dopomohoiu nanoakvakhelatu tsynku. *Skhidno-ievropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2015, 10 (76), pp. 40-44.

Kozak, O. A., Hryshchenko, O. Yu., & Vasylchenko, O. M. (2019). Прогноз виробництва молока в Україні до 2030 року: методика і розрахунки. Київ: ННЦ "ІАЕ".

Kumar, P., Burman, U., & Santra, P. (2015). Effect of nano-zinc oxide on nitrogenase activity in legumes: An interplay of concentration and exposure time. *International Nano Letters*, 5(4), 191–198. <https://doi.org/10.1007/s40089-015-0155-6>

Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 227(5259), 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>

Lavelli, V., & Beccalli, M. P. (2022). Whey recycling in the perspective of the circular economy: Modeling processes and the supply chain to design the involvement of the small and medium enterprises. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.003>

Lemen, R., & Bingham, E. (2001). Silica and Silica Compounds. *Patty's Toxicology*, 181-210. <https://doi.org/10.1002/0471435139.TOX011>

Liu, F., & Tang, C. H. (2016). Soy glycinin as food-grade Pickering stabilizers: Part. I. Structural characteristics, emulsifying properties and

adsorption/arrangement at interface. *Food Hydrocolloids*, 60, 606–619. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.04.027>

Liu, J., Feng, X., Wei, L., Chen, L., Song, B., & Shao, L. (2016). The toxicology of ion-shedding zinc oxide nanoparticles. *Critical Reviews in Toxicology*, 46(4), 348–384. <https://doi.org/10.1080/10408444.2016.1138311>

LOST LTD. (n.d.). Оксид цинку. LOST LTD. Retrieved February 8, 2025, from <https://lost-ltd.if.ua/oksyd-tsynku/>

Manyangadze, M., Chikuruwo, N. H. M., Narsaiah, T. B., Chakra, C. S., Radhakumari, M., & Danha, G. (2020). Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 31, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.11.003>

Meneses, Y. E., & Flores, R. A. (2016). Feasibility, safety, and economic implications of whey-recovered water in cleaning-in-place systems: A case study on water conservation for the dairy industry. *Journal of Dairy Science*. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10332>

Morel, B., Autissier, L., Autissier, D., Lemordant, D., Yrieix, B., & Quenard, D. (2009). Pyrogenic silica ageing under humid atmosphere. *Powder Technology*, 190(2), 225–229. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.049>

Nazem, A., Shaala, E., & Awad, S. (2024). Application of some inorganic metal oxide nanoparticles to control *E. coli* in raw milk. *Open Veterinary Journal*, 14, 545 - 552. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2024.v14.i1.49>

Nestlé. (2021). Sustainable Packaging Strategy. Retrieved from <https://www.nestle.com/>

Nile, S. H., Baskar, V., Selvaraj, D., Nile, A., Xiao, J., & Kai, G. (2020). Nanotechnologies in food science: Applications, recent trends, and future perspectives. *Nano-Micro Letters*, 12, 12–45. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0383-9>

Orisil. (n.d.). Про продукт. Retrieved January 7, 2025, from <https://orisil.ua/pro-produkt/>

Parniakov, O., Bals, O., Barba, F. J., Mykhailyk, V., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2018). Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(3), 362-385. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1180502>

Pereira, D. I. A., Bruggaber, S. F. A., Faria, N., Poots, L. K., Tagmount, M. A., Aslam, M. F., & Powell, J. J. (2014). Nanoparticulate iron(III) oxo-hydroxide delivers safe iron that is well absorbed and utilised in humans. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 10(8), 1877–1886. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2014.06.012>

Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., & Garcia, A. C. (2021). Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>

Poon, C., & Patel, A. (2020). Organic and inorganic nanoparticle vaccines for prevention of infectious diseases. *Nano Express*, 1. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/ab8075>

Prasad, A. S. (2013). Discovery of human zinc deficiency: its impact on human health and disease. *Advances in Nutrition*, 4(2), 176–190. <https://doi.org/10.3945/an.112.003210>

Ravichandran, R. (2010). Nanotechnology applications in food and food processing: Innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry*, 1(2), P72–P96. <https://doi.org/10.1080/19430871003684440>

Reddy, M. S. (1996). Anticaking agent for dairy products (Canadian Patent No. CA2202901A1). Canadian Intellectual Property Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/CA2202901A1/en>

Rhim, J.-W., Park, H.-M., & Ha, C.-S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38, 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2013.05.008>

Saffarionpour, S. (2019). Nanoencapsulation of hydrophobic food flavor ingredients and their cyclodextrin inclusion complexes. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02285-z>

Saffarionpour, S. (2019). Preparation of food flavor nanoemulsions by high-and low-energy emulsification approaches. *Food Engineering Reviews*, 11(4), 245–267. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09201-3>

Sarvi, M., Bee, T., Gooi, C., Woonton, B., Gee, M., & O'Connor, A. (2014). Development of functionalized mesoporous silica for adsorption and separation of dairy proteins. *Chemical Engineering Journal*, 235, 244-251. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.09.036>

Savage, N., & Diallo, M. S. (2005). Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges. *Journal of Nanoparticle Research*, 7(4-5), 331–342. <https://doi.org/10.1007/s11051-005-7523-5>

Schmitt, C., Bovay, C., & Rouvet, M. (2014). Bulk self-aggregation drives foam stabilization properties of whey protein microgels. *Food Hydrocolloids*, 42, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.04.011>

Schuck, P., Blanchard, E., Dolivet, A., Méjean, S., Onillon, E., & Jeantet, R. (2005). Water activity and glass transition in dairy ingredients. *Lait*, 85(4–5), 295–304. <https://doi.org/10.1051/lait:2005020>

Sethi, V. K., Pandey, M., & Shukla, P. (2011). Use of nanotechnology in solar PV cell. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2(2), 77–80.

Silalai, N., & Roos, Y. H. (2010). Roles of water and solids composition in the control of glass transition and stickiness of milk powders. *Journal of Food Science*, 75(5), E285–E296. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01652.x>

Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., & Kaus, N. H. M. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>

Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins—From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*, 18(7), 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>

Solà Rabadà, A. (2016). Experimental studies of zinc oxide and silica peptide interactions (PhD Thesis). Nottingham Trent University. <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/28043/>

Stehlik-Tomas, V., Zetic, V. G., Stanzer, D., Grba, S., & Vahcic, N. (2004). Zinc, copper and manganese enrichment in yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Technology and Biotechnology*, 42(2), 115–120.

Stoscheck, C. M. (1990). Quantitation of protein. *Methods in Enzymology*, 182, 50–68. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(90\)82008-P](https://doi.org/10.1016/0076-6879(90)82008-P)

Sun, R., Lu, J., & Nolden, A. (2021). Nanostructured foods for improved sensory attributes. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 281–286. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.01.011>

Sychevskiy, M., Romanchuk, I., & Minorova, A. (2019). Processing of dairy whey: Prospects in Ukraine. *Food Science and Technology*, 13(4). <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1557>

Szczepaniak, I., & Szajner, P. (2022). Challenges of energy management in the food industry in Poland in the context of the objectives of the European Green Deal and the “Farm to Fork” strategy. *Energies*, 15(23), 9090. <https://doi.org/10.3390/en15239090>

Tamjidi, F., Shahedi, M., Varshosaz, J., & Nasirpour, A. (2013). Nanostructured lipid carriers (NLC): A potential delivery system for bioactive food molecules. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.03.002>

Turov, V. V., Gun'ko, V. M., Krupskaya, T. V., Andriyko, L. S., Marynin, A. I., & Pasichnyi, V. N. (2020). Thixotropic system based on mixture of hydrophilic and hydrophobic silica. *Chemistry, Physics & Technology of Surface*, 11(4), 456–469.

Turov, V. V., Gun'ko, V. M., Krupskaya, T. V., Andriyko, L. S., Marynin, A. I., & Pasichnyi, V. N. (2020). Thixotropic system based on mixture of hydrophilic and hydrophobic silica. *Chemistry, Physics & Technology of Surface*, 11(4), 456–469. <https://doi.org/10.15407/hftp11.04.456>

Українська сироватка користується попитом на світовому ринку. (2018). Інфагро.<https://infagro.com.ua/ua/2018/07/19/ukrayinska-sirovatka-koristuyetsya-popitom-na-svitovomu-rinku/> (Дата звернення: 03.01.2024).

Vermeiren, L., Devlieghere, F., van Beest, M., de Kruijf, N., & Debevere, J. (1999). Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 10(3), 77-86. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00032-1)

Wahab, R., Siddiqui, M. A., Saquib, Q., Dwivedi, S., Ahmad, J., Musarrat, J., & Al-Khedhairi, A. A. (2014). ZnO nanoparticles induced oxidative stress and apoptosis in HepG2 and MCF-7 cancer cells and their antibacterial activity. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 117, 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.02.038>

Walker, G. M. (1994). The roles of magnesium in biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 14(4), 311–354.

Wang, B., Feng, W., Wang, M., Wang, T., Gu, Y., Zhu, M., ... Wang, J. (2007). Acute toxicological impact of nano- and submicro-scaled zinc oxide powder on healthy adult mice. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(2), 263–276. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9245-3>

Westergaard, V. (2010). *Milk powder technology*. GEA Niro.

Wu, H., Yin, J. J., Wamer, W. G., Zeng, M., & Lo, Y. M. (2014). Reactive oxygen species-related activities of nano-iron metal and nano-iron oxides. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22(1), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.007>

Yapıcı, E., Karakuzu-İkizler, B., & Yücel, S. (2021). Anticaking additives for food powders. In B. Ergin Karakuzu-İkizler & S. Yücel (Eds.), *Advances in*

Food Bioproducts and Bioprocessing Technologies (pp. 145–167). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48908-3_6

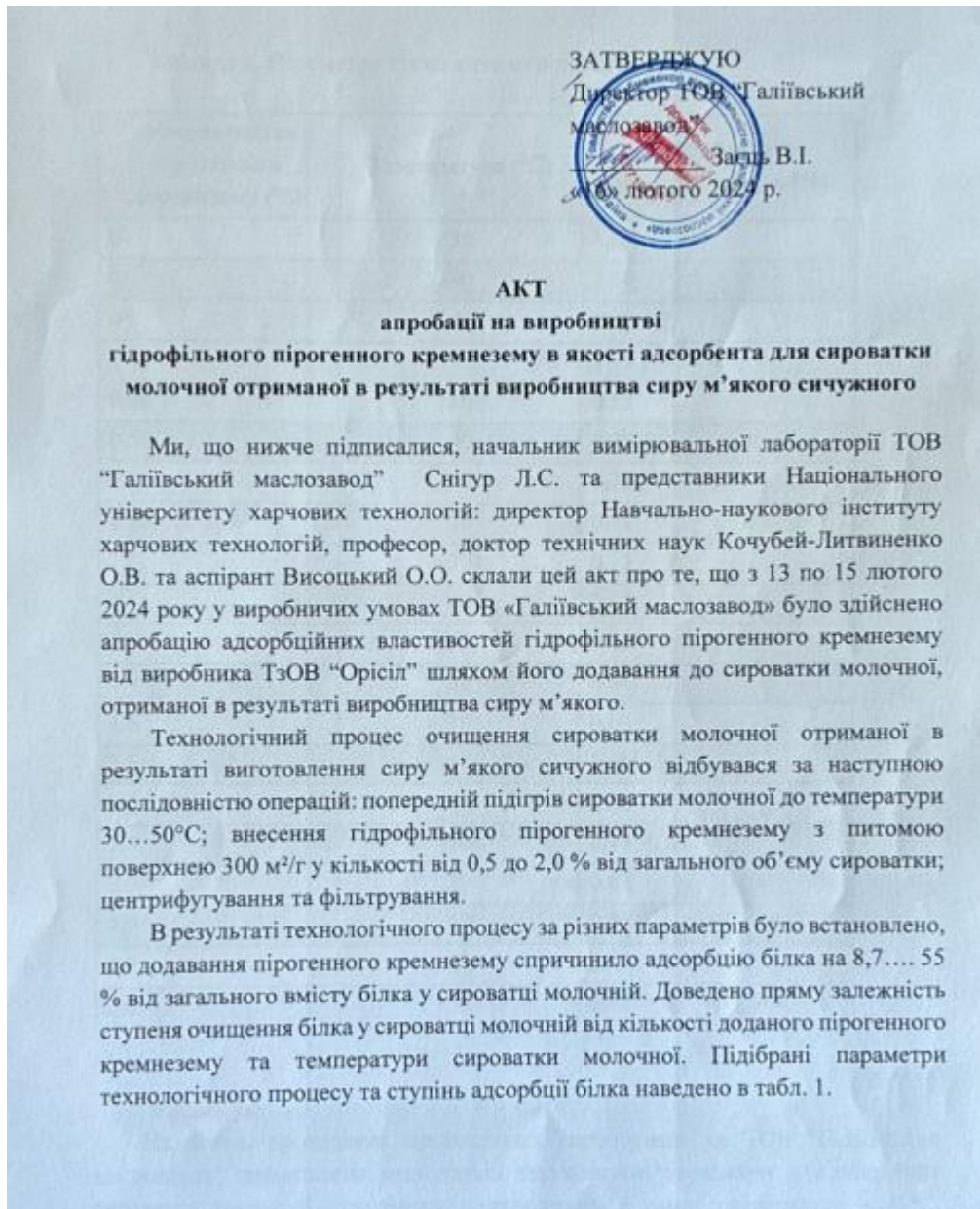
Younes, M., Aggett, P., Aguilar, F., Crebelli, R., Dusemund, B., Filipič, M., ... Lambré, C. (2018). Re-evaluation of silicon dioxide (E 551) as a food additive. *EFSA Journal*, 16. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5088>

Yueyue, M., Zhiqiang, L., Ming, Y., et al. (2022). Enrichment of zinc in *Lactobacillus plantarum* DNZ-4: Impact on its characteristics, metabolites and antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 153, 112462. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112462>

Zhou, B., Tobin, J., Drusch, S., & Hogan, S. (2021). Dynamic adsorption and interfacial rheology of whey protein isolate at oil-water interfaces: Effects of protein concentration, pH and heat treatment. *Food Hydrocolloids*. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.106640>

ДОДАТКИ

Додаток А. Акт апробації на виробництві гідрофільного пірогенного кремнезему в якості адсорбента для сироватки молочної, отриманої в результаті виробництва сиру м'якого сичужного.



Таблиця 1. Параметри технологічного процесу

Масова частка пірогенного кремнезему (%)	Температура (°C)	Масова частка загального білка (%)
0	30	1.09
0	40	1.10
0	45	1.10
0	50	1.11
0.50	30	0.83
0.50	40	0.76
0.50	45	0.71
0.50	50	0.71
1	30	0.73
1	40	0.67
1	45	0.62
1	50	0.61
1.5	30	0.64
1.5	40	0.55
1.5	45	0.50
1.5	50	0.49
2.0	30	0.62
2.0	40	0.54
2.0	45	0.49
2.0	50	0.48

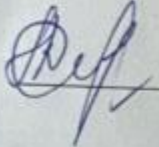
Висновки.

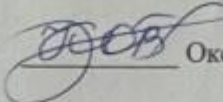
На основі проведених промислових випробувань на ТОВ "Галіївський маслозавод" встановлено раціональні технологічні параметри для очищення сироватки молочної пірогенним кремнеземом, а саме: температура – 45°C, кількість пірогенного кремнезему – 1,5%


Отже, доведена доцільність застосування гідрофільного пірогенного кремнезему в якості адсорбента для сироватки молочної отриманої в результаті виробництва сиру м'якого сичужного на ТОВ "Галіївський маслозавод".

Від ТОВ «Галіївський
маслозавод»:

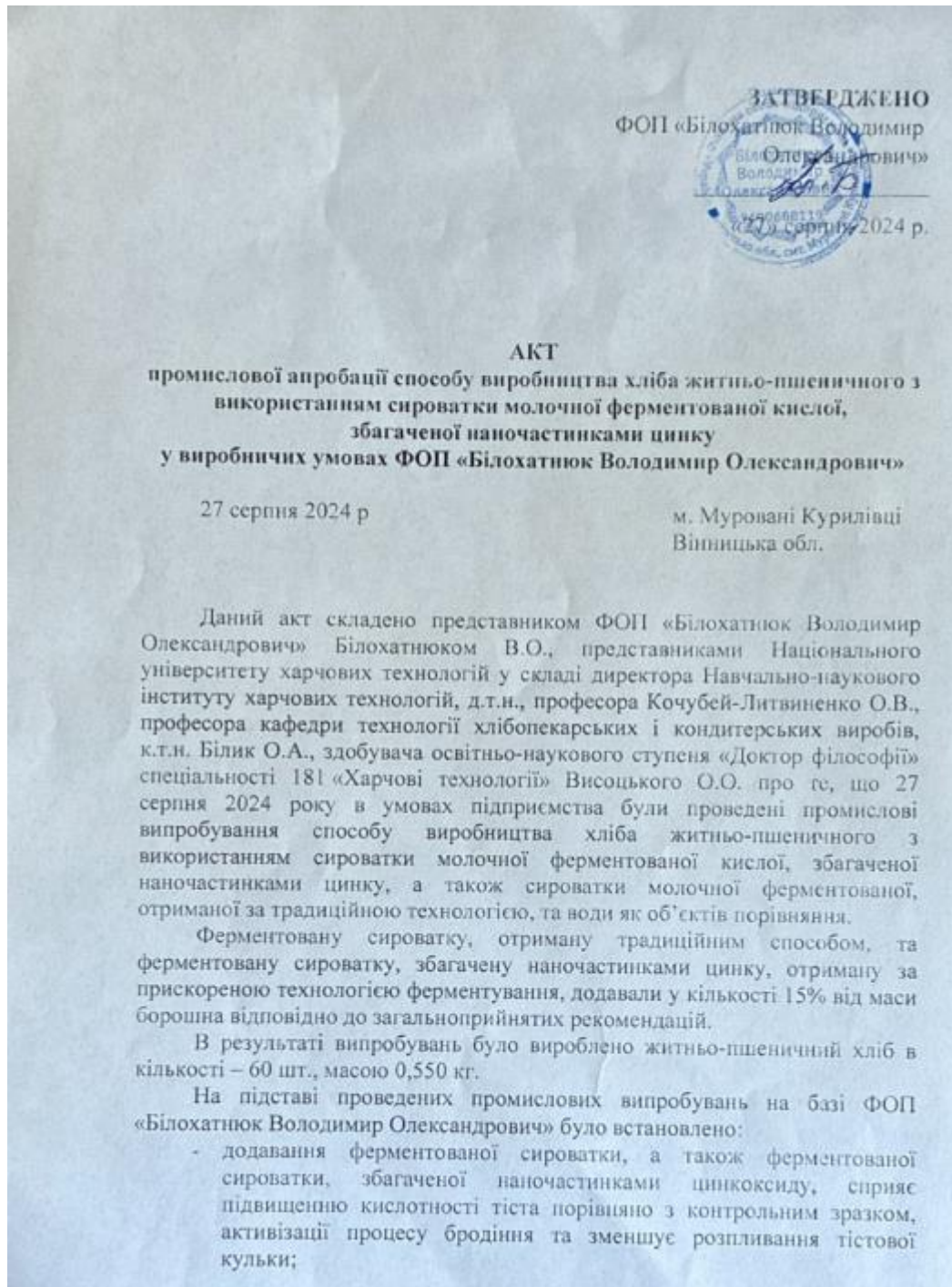
Від НУХТ:


Людмила СНИГУР


Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО


Олександр ВИСОЦЬКИЙ

Додаток Б. Акт промислової апробації способу виробництва хліба житньо-пшеничного з використанням сироватки молочної ферментованої кислотою, збагаченої наночастинками цинку у виробничих умовах ФОП «Білохатнюк Володимир Олександрович».



- підвищення питомого об'єму тіста та покращення еластичності клейковинного каркасу, за умов додавання ферментованої сироватки обох видів, спричиняло збільшення питомого об'єму хліба житньо-пшеничного. Так, у хлібі з ферментованою сироваткою цей показник зріс на 7,9 %, а у хлібі із сироваткою, збагаченою цинком, – на 11,5% порівняно з контрольним зразком;
- додавання ферментованої сироватки, а також ферментованої сироватки, збагаченої цинком, покращує формостійкість виробів, що робить цей продукт придатним як для подового, так і для формового випікання;
- у хлібі з ферментованою сироваткою, збагаченою цинком, ступінь черствіння зменшився в середньому на 30,0 % порівняно з контрольним зразком після 72 годин зберігання.

Отже, експериментальним випіканням у виробничих умовах було доведено доцільність використання сироватки молочної ферментованої, збагаченої наночастинками цинку, з рівнем титрованої кислотності 160 ± 10 °Т в технології хліба житньо-пшеничного з метою покращення органолептичних, фізико-хімічних показників якості готових виробів, їх збагачення есенціальним цинком та уповільнення процесу черствіння.

Представник ФОП «Білохатнюк Володимир Олександрович»



Володимир
БІЛОХАТНЮК

Представники Національного університету харчових технологій

Директор Навчально-наукового інституту харчових технологій, д.т.н., професор

Оксана КОЧУБЕЙ-ЛІТВИНЕНКО

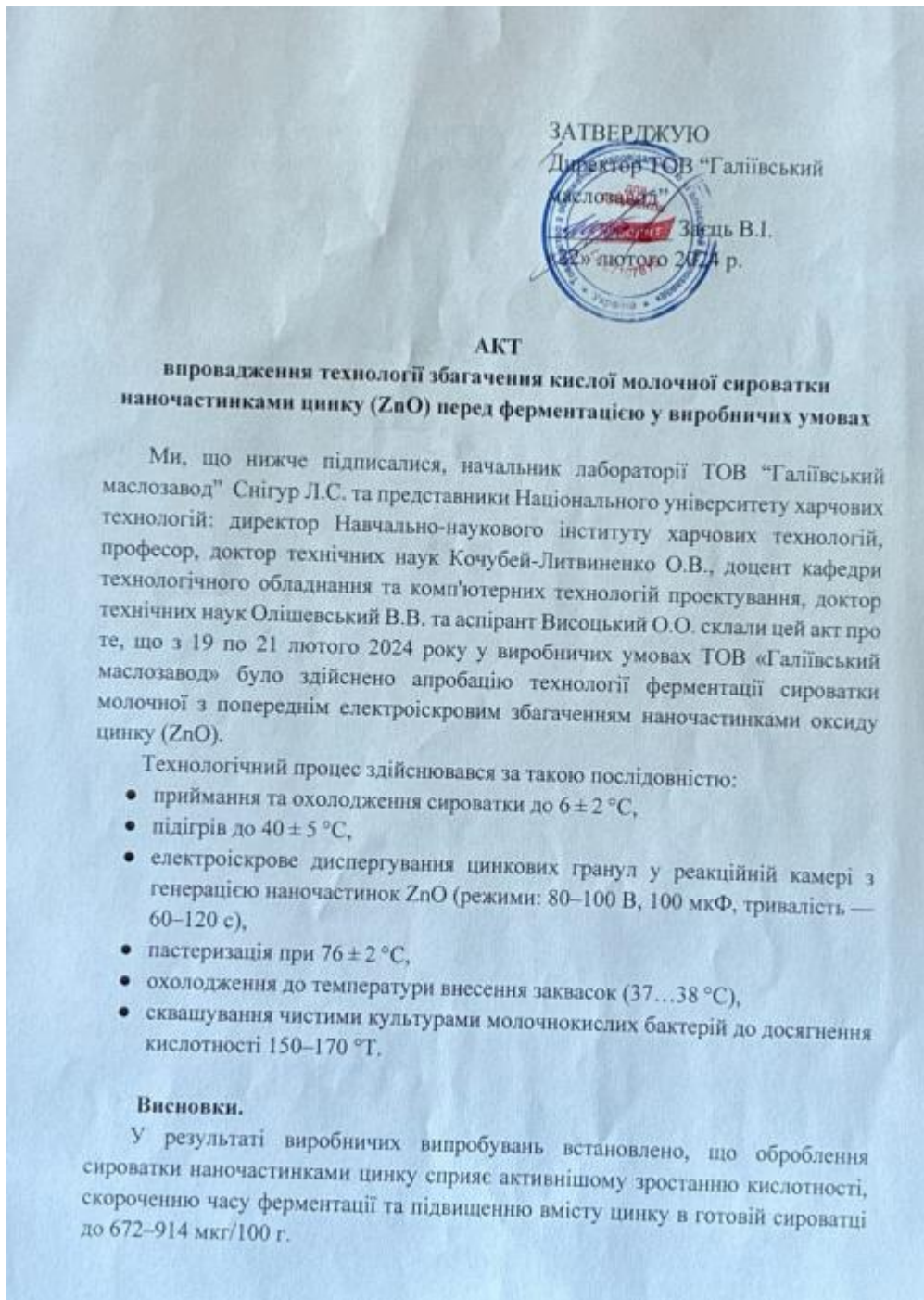
Професор кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів, к.т.н.

Олена БІЛІК

Здобувач освітньо-наукового ступеня «Доктор філософії»

Олександр ВИСОЦЬКИЙ

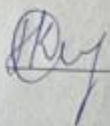
Додаток В. Акт впровадження технології збагачення кислої молочної сироватки наночастинками цинку (ZnO) перед ферментацією у виробничих умовах.



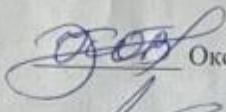
Отже, доведена доцільність впровадження запропонованої технології на виробництві кисломолочної продукції як способу покращення її мікроелементного складу та функціональних властивостей.

Від ТОВ «Галіївський
маслозавод»:

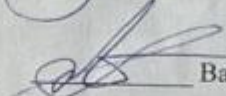
Від НУХТ:



Людмила СНИГУР



Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО




Валентин ОЛШЕВСЬКИЙ



Олександр ВИСОЦЬКИЙ

Додаток Г. Акт впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і дисертаційних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

 ЗТВЕРДЖУЮ
Проректор НУХТ
Сергій ТОКАРЧУК

АКТ

впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і дисертаційних робіт у навчальний процес вищих навчальних закладів

м. Київ «27» листопада 2023 р.

Замовник Національний університет харчових технологій в особі про-
ректора з наукової роботи ТОКАРЧУКА Сергія, який діє на підставі наказу
№87 від 20.10.22р.

Дійсним актом підтверджується, що результати: прикладних наукових
досліджень на тему «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефек-
тивних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив
продовольчої безпеки» (номер державної реєстрації 0123U102060)
(найменування виду роботи, найменування теми, № держ. реєстрації)

виконані в Проблемній науково-дослідній лабораторії НУХТ з
01.05.2023 р. по 30. 09.2023 р. та впроваджені у навчальний процес кафедри
технології молока і молочних продуктів та кафедри технології хлібопекарських
і кондитерських виробів

1. Вид впроваджених результатів: 1) Технологічні рекомендації щодо ефективного застосування пірогенного кремнезему з питомою поверхнею 300 м²/г, виготовленого на ДП «Калуський дослідно-експериментальний завод Інституту хімії поверхні НАН України імені О.О. Чуйка», як антизлежувальної харчової добавки Е 551 для сухих молочних продуктів з метою підвищення їх стабільності під час зберігання. 2) Розроблено спосіб та технологічні рекомендації щодо очищення сироватки молочної від радіоізотопів ¹³⁷Cs шляхом використання природного неорганічного сорбенту - пірогенного кремнезему в нанорозмірному діапазоні

Отриманні результати використано:
- при підготовці матеріалів та викладанні лекції на тему «Харчові добавки,
які подовжують термін зберігання якості молочних продуктів. Основні підходи
щодо їхнього використання в країнах ЄС» та під час розроблення лабораторно-
го заняття на тему «Вивчення впливу антизлежувальних добавок на стійкість до
зберігання сухих молочних продуктів» в дисципліні «Харчові добавки: гармоні-
зація регламентів ЄС у виробництві молочних і молокозмісних продуктів» для

здобувачів ОС «магістр» спеціальності 181 «Харчові технології», ОПП «Технології зберігання, консервування та переробки молока»;

- при підготовці матеріалів та викладанні лекції на тему « Теоретичні основи довготривалого зберігання молочних продуктів» та під час розроблення лабораторного заняття на тему «Вивчення впливу технологічних факторів на терміни зберігання молочних консервів» в дисципліні «Технології консервування та зберігання молочних продуктів» для здобувачів ОС «бакалавр» спеціальності 181 «Харчові технології», ОПП «Харчові технології та інженерія»;

- при підготовці матеріалів та викладанні лекції на тему «Основні підходи щодо використання харчових добавок у різних галузях харчової промисловості країн ЄС» з дисципліни «Регулювання використання харчових добавок в різних технологіях та гармонізація європейських регламентів в Україні на шляху євроінтеграції» для здобувачів ОС «магістр» спеціальності 181 «Харчові технології» ОПП Технології хліба, кондитерських, макаронних виробів та харчоконцентратів»;

- виконання кваліфікаційних робіт здобувачів ОС «бакалавр» та ОС «магістр».

2. Форма впровадження: лекційні та лабораторні заняття, виконання кваліфікаційних робіт здобувачів ОС «бакалавр» та ОС «магістр».

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт: Доведено, що пірогенний кремнезем у кількості $0,9 \pm 0,1$ % (мас.) уповільнює процес самоущільнення та злежування під час довготривалого зберігання. Ступінь злежування, визначена за використання сит з розміром чарунок 500 мкм, становить $8,1 \pm 0,2$ %, що характеризує продукт як не схильний до злежування;

Дослідженнями температури склування дослідних зразків сироватки молочної сухої доведено, що суха сироватка із додаванням антизлежувальної добавки перебуватиме переважно в склоподібному стані за нормованих в Україні режимів зберігання (від 0 до 20 °С, відносна вологість не більше ніж 80 %), а отже, буде стійкою до зберігання;

Розрахунком індексу чутливості до злежування та налипання і експериментальними даними ступеня злежування підтверджено, що за додавання пірогенного кремнезему у кількості $0,9 \pm 0,1$ % до загальної маси сироватки молочної сухої прогнозованим буде зменшення ризику злежування (індекс $SCS_{зд} = 5$) та незначне зниження адгезійної здатності (індекс $SCS_{адг} = 7$);

Доведено відсутність негативного впливу пірогенного кремнезему вітчизняного виробництва на розчинність сироватки молочної сухої та ознаки неферментативного потемніння.

Науково-обгрунтовано доцільність використання пірогенного кремнезему в нанорозмірному діапазоні з метою зниження питомої активності ^{137}Cs у сироватці молочній, що отримана у регіонах зі специфічними ґрунтами, забруднених радіонуклідами у віддалений період після аварії на Чорнобільській АЕС.

4. Перелік освітніх компонентів, у рамках яких викладені результати НДР: освітня компонента «Технології консервування та зберігання молочних продуктів» для здобувачів ОС «бакалавр» спеціальності 181 «Харчові технології», ОПП «Харчові технології та інженерія»;

освітня компонента «Харчові добавки: гармонізація регламентів ЄС у виробництві молочних і молоковмісних продуктів» для здобувачів ОС «магістр» спеціальності 181 «Харчові технології» ОПП «Технології зберігання, консервування та переробки молока»;

освітня компонента «Регулювання використання харчових добавок в різних технологіях та гармонізація європейських регламентів в Україні на шляху євроінтеграції» для здобувачів ОС «магістр» спеціальності 181 «Харчові технології» ОПП Технології хліба, кондитерських, макаронних виробів та харчоконцентратів»;

кваліфікаційні роботи здобувачів ОС «бакалавр» та ОС «магістр» перелічених вище освітніх програм.

5. Ефект від впровадження (соціальний, науково-технічний, тощо): Використання пірогенного кремнезему вітчизняного виробництва у якості антизлежувальної добавки має практичне значення для молокопереробних підприємств, оскільки сприятиме забезпеченню стабільності показників якості сухих молочних продуктів під час зберігання та подовженню термінів їх зберігання.

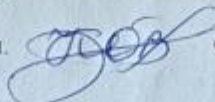
Використання пірогенного кремнезему в якості радіопротекторної добавки для очищення сироватки молочної від радіоізотопів ^{137}Cs сприятиме забезпеченню безпечності молочних продуктів у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС.

Завідувач ПНДЛ
старший науковий
співробітник, к.т.н.



Андрій МАРИНІН

Науковий керівник теми
головний науковий
співробітник ПНДЛ, д.т.н.



Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО

Виконавці теми:
старший науковий
співробітник ПНДЛ, к.т.н.



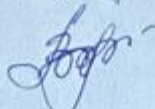
Олена БЛИК

старший науковий
співробітник ПНДЛ, к.т.н.



Тетяна ОСЬМАК

здобувач ОНС
Доктор філософії



Олександр ВИСОЦЬКИЙ

Додаток Д. Список публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

Статті у вітчизняних та закордонних виданнях

1. Кочубей-Литвиненко, О. В., Білик, О. А., Дубівко, А. С., Висоцький, О. О., & Швець, Д. П. (2020). Дослідження впливу електроіскрового оброблення на білки молочної сироватки. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 26(5), 182–189. (Наукове фахове видання України, категорія Б, індексується у наукометричних базах EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus).

Особистий внесок Висоцького О. О.: проведення експериментальних досліджень, аналіз білкових фракцій, обробка результатів, оформлення тексту; особистий внесок Кочубей-Литвиненко О. В.: наукове керівництво, постановка завдань, редагування тексту; Білик О. А.: аналіз літературних джерел, формулювання висновків; Дубівко А. С.: участь у проведенні лабораторних досліджень, обробка результатів; Швець Д. П.: формування та обробка графічного матеріалу

2. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2022). Вплив пірогенного кремнезему на стабільність сироватки молочної сухої під час зберігання. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 28(5), 158–167. (Наукове фахове видання України, категорія Б, індексується у наукометричних базах EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus)

3. Vysotskyi, O., Kochubei-Litvinenko, O., Bilyk, O., & Bilokhatniuk, V. (2023). Use of fermented acid whey enriched with mineral elements in the technology of rye-wheat bread. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 23(4), 28–34. (Наукове фахове видання України, категорія Б, індексується у наукометричних базах DOAJ (Directory of Open Access Journals), Index Copernicus, OpenAlex, Scite).

Особистий внесок Vysotskyi O.: проведення експериментальних досліджень, аналіз результатів, написання рукопису; Kochubei-Lytvynenko O.: планування експерименту, наукове редагування; Bilyk O.: статистичний аналіз, планування експерименту; Bilokhatniuk V.: оцінювання органолептичних показників і характеристик хліба

4. Kochubei-Lytvynenko, O., Bilyk, O., Vysotskyi, O., & Zabroda, A. (2024). Consideration of technological and safety aspects of using zinc oxide nanoparticles for intensifying whey fermentation. *Technology audit and production reserves*, 4(3 (78)). (Наукове фахове видання України, категорія Б, індексується у наукометричних базах Scopus, EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus, ERIH PLUS, OpenAIRE, DOAJ, FSTA, WorldCat та інших). *Особистий внесок Vysotskyi O.: проведення експериментів із ферментацією, вивчення змін мікробіологічних показників; Kochubei-Lytvynenko O.: наукове керівництво, формулювання мети і завдань; Bilyk O.: проведення експериментів із ферментацією, токсикологічне обґрунтування; Zabroda A.: аналіз нормативних аспектів безпечності.*

5. Кочубей-Литвиненко, О. В., Дубівко, А. С., & Висоцький, О. О. (2024). Оцінювання цитотоксичності наночастинок ZnO альтернативним методом на білках плазми крові людини в умовах *in vitro*. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 30(3), 167–174. (Наукове фахове видання України, категорія Б, індексується у наукометричних базах EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus). *Особистий внесок Висоцького О. О.: підготовка біологічних зразків, допомога у підготовці графічного матеріалу, аналіз результатів; Кочубей-Литвиненко О. В.: наукове керівництво, загальне редагування; Дубівко А. С.: проведення спектрофотометричних вимірювань.*

Тези доповідей і матеріали конференцій

6. Кочубей-Литвиненко, О. В., Висоцький, О. О., & Маринін, А. І. (2021). Перспективи використання пірогенного діоксиду кремнію у якості

антизлежувальної харчової добавки для сироватки молочної сухої. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні: Матеріали I міжнародної науково-практичної конференції (29–30 листопада 2021 р., Київ) (с. 80–83). Київ: НУХТ.

7. Висоцький, О. О., Кочубей-Литвиненко, О. В., & Маринін, А. І. (2022). Підвищення стабільності до зберігання сироватки молочної сухої шляхом використання пірогенного кремнезему. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 88-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (15–16 квітня 2022 р., Київ) (Ч. 1, с. 243). Київ: НУХТ.

8. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Перспективи використання діоксиду кремнію E551 у якості радіопротекторної добавки для очищення молочної сироватки. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах ЄС та в Україні: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції (25 жовтня 2023 р., Київ) (с. 67). Київ: НУХТ.

9. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Пірогенний кремнезем – перспективна радіопротекторна добавка для очищення молочної сировини. У Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України (м. Київ, 25 травня 2023 р.) (с. 288–290). Київ.

10. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2023). Перспективи очищення сироватки молочної від білку застосуванням пірогенного кремнезему. У Сучасні тренди і перспективи в галузі переробки

м'яса і молока: Програма та тези матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 21 вересня 2023 р.) (с. 11–12). Київ: НУХТ.

11. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2024). Перспективи використання освітленої пірогенним кремнеземом молочної сироватки як косубстрату для виробництва біогазу. Молочна промисловість від виробника до споживача: Сучасні тренди та орієнтири: Програма та матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (29 травня 2024 р., Київ) (с. 64). Київ: НУХТ.

12. Кочубей-Литвиненко, О. В., Дубівко, А. С., Висоцький, О. О., & Дмитруха, Н. В. (2024). Визначення кисень-активуючої активності макрофагів щурів під впливом наночастинок ZnO в НСТ-тесті у порівнянні із сіллю ZnSO₄. Молочна промисловість від виробника до споживача: Сучасні тренди та орієнтири: Програма та матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (29 травня 2024 р., Київ) (с. 72). Київ: НУХТ.

13. Кочубей-Литвиненко, О. В., Білик, О. А., & Висоцький, О. О. (2024). Обґрунтування шляхів удосконалення технології сироватки молочної сухої, як імперативу продовольчої безпеки. У Сучасні аспекти реформування системи публічного управління в умовах воєнного часу: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Переяслав, 7 червня 2024 р.) (с. 175–179).

14. Висоцький, О. О., Забрда, А. В., Кочубей-Литвиненко, О. В., & Білик, О. А. (2024). Сироватка кисла ферментована, збагачена мінеральними елементами у технології хлібобулочних виробів для людей похилого віку. Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference “Business Culture in the Conditions of Socio-Cultural Transformation of Society” (Ліон, Франція, 23–26 липня 2024 р.) (с. 199–201).

15. Кочубей-Литвиненко, О. В., & Висоцький, О. О. (2024). Наночастинки ZnO як фактор інтенсифікації процесу виробництва

сироватки ферментованої кислоти. У XIII-та Міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології у контексті Євроінтеграції» (м. Київ, 21–22 листопада 2024 р.) (с. 202–204). Київ: НУХТ.

16. Висоцький, О. О., & Кочубей-Литвиненко, О. В. (2025). Дослідження адсорбційних властивостей пірогенного кремнезему за допомогою електрофоретичного аналізу білків сироватки молочної. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (7–11 квітня 2025 р., Київ) (Ч. 1, с. XX). Київ: НУХТ.

17. Роговий, О., Висоцький, О., & Кочубей-Литвиненко, О. (2025). Перспективи використання нано-ZnO для інтенсифікації ферментування сироватки молочної кислоти в умовах крафтового виробництва. Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 91-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів (7–11 квітня 2025 р., Київ) (Ч. 1). Київ: НУХТ.