УДК 631.8:577.16

NANOTECHNOLOGIES IN FOOD QUALITY AND SAFETY CONTROL

S. Panasiuk, https://orcid.org/0000-0001-9734-3998
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
Ye. Kryvokhyzha, https://orcid.org/0000-0001-7270-6529
Chernivtsi Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Chernivtsi, Ukraine

Key words:
Quality
Nanotechnology
Nanosensors
"Smart" packaging
Safety
Food products

Article history:
Received 05.01.2026
Received in revised form 21.01.2026
Accepted 06.02.2026
Published 27.02.2026

Corresponding author:
S. Panasiuk
E-mail:
svitlana78_@ukr.net

Citation: Панасюк С. Г., Кривохижа Є. М. (2026). Нанотехнології у контролі якості та безпечності харчових продуктів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 32(1), 22—39. https://doi.org/10.24263/2225-2924-2026-32-1-4

ISSN 2617-1945 (online)
ISSN 2225-2924 (print)

CC BY

ABSTRACT

The utilization of nanostructures, nanosensors, nanobiodetectors, and "smart" casings permits swift, very sensitive, and precise identification of hazardous substances and microflora even in minute quantities. The incorporation of nanotechnologies into the procedures of the food sector is especially pertinent when aligning domestic regulations with global standards (ISO, HACCP, Codex Alimentarius). Therefore, investigating the potential and avenues for applying nanotechnologies in food quality assessment and security is both timely and scientifically important, offering considerable practical value for advancing contemporary food monitoring systems. The primary avenues for employing nanotechnologies within the food quality assurance and safety framework were considered, the potential of incurporating nanosensors and nanobiosensors for identifying biological and chemical contaminants was examined, the role of nanomaterials in developing smart packaging was illustrated, and the benefits and potential hazards associated with adopting nanotechnological methods in the food sector were concurrently summarized. The objective of this study was a thorough examination and assessment of nanotechnologies' capacity to ensure the standard and security of foodstuffs. Conceptual methods for ascertaining the merit and security of foodstuffs were examined. Contemporary techniques for food characteristic oversight were explored and their efficacy was evaluated. The primary sectors for utilizing nanotechnologies in the domain of guaranteeing food security were delineated. A categorization of nanotechnologies within food setups was offered. The capability of employing nanotechnologies to identify harmful contaminants in foodstuffs was examined. The regulatory facets of incorporating nanotechnologies into the food domain were looked into. Additional avenues for advancing nanotechnologies to assure the excellence and security of food items in the present food sector were presented.

DOI: 10.24263/2225-2924-2026-32-1-4

НАНОТЕХНОЛОГІЇ У КОНТРОЛІ ЯКОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

С. Г. Панасюк, https://orcid.org/0000-0001-9734-3998
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
Є. М. Кривохижа, https://orcid.org/0000-0001-7270-6529
Чернівецький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету, Чернівці, Україна

Застосування наноструктур, нанодатчиків, нанобіодетекторів та «інтелектуальної» оболонки дає змогу проводити оперативний, високочутливий та вибірковий пошук шкідливих сполук і мікрофлори навіть у залишкових кількостях. Особливої актуальності набуває впровадження нанотехнологій у практику харчової промисловості в умовах гармонізації національних стандартів з міжнародними вимогами (ISO, HACCP, Codex Alimentarius). Саме тому дослідження можливостей і напрямів застосування нанотехнологій у контролі якості та безпечності харчових продуктів є своєчасним і науково значущим, а також має вагоме прикладне значення для розвитку сучасних систем харчового контролю.

У статті окреслено головні напрями використання нанотехнологій у системі контролю якості та безпечності харчових продуктів, розглянуто спроможності використання наносенсорів і нанобіосенсорів для знаходження біологічних та хімічних домішок, описано функцію наноматеріалів у формуванні інтелектуального пакування, а також підсумовано переваги й можливі загрози запровадження нанотехнологічних рішень у харчовій індустрії. Метою дослідження є всебічне вивчення й аналіз спроможностей використання нанотехнологій для гарантування якості та безпечності харчових продуктів. Проаналізовано теоретичні підходи до визначення якості та безпечності харчових продуктів. Досліджено сучасні методи контролю якості харчових продуктів та проведено оцінювання їх ефективності. Охарактеризовано основні напрями застосування нанотехнологій у сфері забезпечення безпечності харчових продуктів. Подано класифікацію нанотехнологій у харчових системах. Розглянуто потенціал застосування нанотехнологій для виявлення шкідливих домішок у харчових продуктах. Окреслено подальші шляхи розвитку нанотехнологій задля забезпечення якості та безпечності харчових продуктів у теперішній харчовій індустрії.

Ключові слова: *якість, нанотехнології, наносенсори, «розумне» пакування, безпечність, харчові продукти.*

Постановка проблеми. Забезпечення високої якості та безпечності харчових продуктів є однією з найбільших проблем харчової промисловості. Нанотехнології виступають могутнім трансформаційним чинником. Попри численні інноваційні продукти та процеси розробки в харчовій промисловості, нанотехнології стикаються зі значним викликом.

Недостатність дієвих систем нагляду за станом виробів у часі, що триває, є значущою вадою звичних методів. Старі лабораторні способи не дають змоги реалізувати постійне спостереження. Як елементи вивчення застосовуються графенові наноструктури, вуглецеві нанотрубки та металеві наночастинки. Питання безпеки

продовольства окреслюється через збільшення числа випадків хімічного та біологічного забруднення. Обмежені звичні мікробіологічні техніки, що вимагають тривалого періоду інкубації.

Тому безпечне використання нанотехнологій у харчовому секторі країн, що розвиваються, слід ретельно підкреслювати як на споживчому, так і на промисловому рівнях. Однак непорозуміння в регуляторних питаннях, а також прогалини в знаннях щодо ретельності використання, діяльності та властивостей наночастинок іноді обмежують ширше застосування наночастинок у харчовому секторі як на приватному, так і на виробничому рівнях.

Практична цінність такого підходу полягає у формуванні сучасних систем контролю, які відповідають міжнародним нормам безпечності продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження в галузі застосування нанотехнологій у біологічних дослідженнях показали значні перспективи для розвитку наукового дослідження нового покоління. Так, у праці (Старинський та ін., 2021) досліджували сучасний стан правового регулювання використання нанотехнологій. (Кушнірук & Циганкова, 2024) досліджували переваги нанотехнологій. У (Онопрієнко & Онопрієнко, 2022; Гнатюк та ін., 2024) розглянуто класифікацію та інноваційні підходи в нанотехнологіях. Як зазначають (Томаля та ін., 2023), використання нанотехнологій дозволяє підвищувати ефективність заходів щодо контролю за якістю продуктів.

Ngangom та ін. (2024) зазначають, що нанотехнології в харчовій галузі забезпечать більш новаторські системи пакування, здатні моніторити якість продовольства, пролонгувати термін збереження та скоротити обсяг відходів.

Значна частина громадськості залишається необізнаною, головним чином, щодо нанотехнологічних продуктів або дезінформованою, що ставить під сумнів те, як саме таке ставлення буде справлятися зі споживчими товарами, що містять нанотехнології (Yadav & Pandey, 2024).

Щодо безпечності харчових продуктів, нанотехнології досягли великих звершень. Boro та ін. (2025) доповіли, що одне із застосувань наночастинок охоплює синтез дієвих антимікробних пакувальних субстанцій для нагляду за патогенами й зменшення харчових отруєнь.

Дослідники (Ivanov та ін., 2025; Kusuma та ін., 2023; Jose, 2024) вивчали нанотехнології для поліпшення моніторингу якості харчових продуктів.

У сучасних наукових розробках контролю якості та безпечності харчових продуктів велика увага приділяється застосуванню нанотехнологій (Javed та ін., 2025). Особливе місце посідають оптичні та електрохімічні біосенсори (Boro та ін., 2025).

Хоч ці напрацювання показують трансформаційний потенціал нанотехнологій у біологічних дослідженнях, декілька невирішених питань заважають їх подальшому впровадженню. Серед найважливіших проблем нормативно-правові аспекти застосування нанотехнологій у галузі харчових продуктів; обґрунтування основних напрямів застосування нанотехнологій у сфері забезпечення безпечності харчових продуктів; проведення класифікації нанотехнологій у харчових системах і визначення перспектив розвитку нанотехнологій у забезпеченні якості та безпечності харчових продуктів в умовах сучасної харчової промисловості.

Метою дослідження є вивчення й аналіз можливостей застосування нанотехнологій для контролю якості та безпечності харчових продуктів.

Матеріали і методи. Дослідження проводилося на підставі наукових праць у сфері нанотехнологій, які містять детальний опис методів і принципів функціонування нанотехнологій. Це дозволило впорядкувати матеріал та підкреслити наукову доцільність впровадження нанотехнологій у харчовій індустрії.

Викладення основних результатів дослідження. Нанонаука та нанотехнології — це нові рубежі цього століття. Їх застосування в сільському господарстві та харчовому секторі є відносно новим порівняно з їх використанням у доставлянні ліків і фармацевтиці. Слово «нано» походить від грецького «nanos», що означає «карлик». Нанотехнології — це галузь прикладної науки й техніки, яка займається контролем матерії на нанометровому масштабі, мільярдній частці метра, а також розробкою та впровадженням пристроїв такого масштабу.

Сучасна харчова промисловість перебуває в умовах стрімкого технологічного розвитку, зростання глобальної конкуренції та підвищених вимог споживачів до якості й безпечності харчових продуктів. Поряд із традиційними напрямами інновацій усе більшої актуальності набувають нанотехнології — міждисциплінарна галузь науки й техніки, що оперує матеріалами та структурами нанорозмірного рівня та дозволяє цілеспрямовано змінювати їх фізико-хімічні й біологічні властивості.

У харчовій промисловості харчові наносенсори можуть застосовуватися для покращення оцінки якості та безпечності харчових продуктів (Elkader та ін., 2020). Завдяки дивовижно новим властивостям будь-якої молекули нанорівня наночастинки (НМ) знайшли промислове застосування в багатьох нанотехнологіях у галузі електроніки, медицини, медичних виробів, біоремедіації, сільського господарства тощо.

Одними з чільних напрямків є аналітичні методи, що ґрунтуються на фізико-хімічних засадах, зокрема — спектроскопія. Хроматографічні методи (газова, рідинна та інші) гарантують високу селективність і чутливість при ідентифікації домішок, пестицидів, забруднювачів і серійних розбіжностей у продукції (Kovalchuk, 2024).

На думку (Kumar та ін., 2021) нанотехнології відіграють велику роль у харчовій промисловості. Ці технології зараз є провідними в основній галузі харчової промисловості, також розвиваються інші технології (Suthar та ін., 2020). Метод наноінкапсуляції широко відомий завдяки успішному доставлянні поживних речовин в організм із застосуванням біоактивних сполук (Jangid та ін., 2025).

Одним із головних напрямків використання нанотехнологій є наносенсори та системи контролю безпечності харчових продуктів. Наносенсори здатні знаходити надзвичайно малі концентрації шкідливих речовин — патогенних мікроорганізмів (*Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*), токсинів, алергенів, пестицидів, важких металів і залишків ветеринарних препаратів (Islam та ін., 2024). Завдяки застосуванню наночастинок золота, срібла, вуглецевих нанотрубок або квантових точок досягається висока чутливість і швидкість аналізування. Такі системи дозволяють проводити експрес-огляд безпосередньо на виробництві або в пунктах реалізації, мінімізуючи потребу у складних лабораторних дослідженнях і знижуючи ризик потрапляння небезпечної продукції до споживача. Такі системи дозволяють проводити експрес-огляд безпосередньо на виробництві або в пунктах реалізації, мінімізуючи потребу у складних лабораторних дослідженнях і знижуючи ризик потрапляння небезпечної продукції до споживача.

Іншим значущим напрямком є наноматеріали з антимікробними властивостями. Наночастинки срібла, оксиду цинку, діоксиду титану та міді активно вивчаються та використовуються для стримування росту патогенних і шкідливих мікроорганізмів. Їх додають до складу покриттів для харчового устаткування, поверхонь виробничих підприємств, а також до пакувальних матеріалів (Kovalchuk, 2024). На відміну від звичайних антисептиків, наноматеріали вирізняються тривалішою дією та меншою ймовірністю формування мікробної стійкості. Це значно підвищує рівень санітарної безпеки та знижує небезпеку повторного забруднення харчових продуктів (Nile та ін., 2020).

Нанокохлеати використовуються для ефективнішої доставки поживних речовин до клітин, не порушуючи смак або колір їжі. Однак самоорганізовані нанорозмірні рідкі структури використовуються як носії та називаються розширеними міцелами; їхній розмір менше 30 нм. Їх використовували для доставки нутрицевтиків і напоїв. Потенційні застосування включають продукти, що містять лікопен, омега-3 жирні кислоти, β-каротин та ізофлавони. Американська компанія Fresh Corporation випустила інноваційну нанокераміку, яка дозволяє наносушити продукти, що вдвічі зменшує використання олії у фаст-фуді та ресторанах завдяки своїй величезній поверхні. Таким чином, наноінкапсуляція забезпечує точну (біо)-доступність продукту з певною швидкістю протягом цільового часу.

Третій напрям пов'язаний із наноструктурованими пакувальними матеріалами. Так зване «активне» та «розумне» пакування є одним із найперспективніших досягнень нанотехнологій у харчовій галузі. Нанокомпозити на базі полімерів і наноглин, оксидів металів чи біополімерів покращують бар'єрні властивості упаковок стосовно кисню, вологи та ультрафіолетового випромінювання (Wahab та ін., 2024).

Водночас важливим напрямом є оцінка та управління ризиками, пов'язаними з використанням нанотехнологій. Забезпечення безпечності харчових продуктів передбачає не лише використання наноматеріалів, а й ретельне вивчення їх токсикологічних властивостей, міграції з пакування у продукт, накопичення в організмі людини та впливу на довкілля. Сучасні дослідження зосереджені на розробці нормативної бази, стандартів безпеки та методів ідентифікації наночастинок у харчових системах (Poeta та ін., 2023). Це є необхідною умовою відповідального та контрольованого впровадження нанотехнологій у харчову промисловість, а також відповідального та контрольованого впровадження нанотехнологій у харчову промисловість.

У табл.1 наведено ключові напрямки застосування нанотехнологій у сфері забезпечення безпечності харчових продуктів та їх узагальнену характеристику.

Таблиця 1. **Основні напрямки застосування нанотехнологій у забезпеченні безпечності харчових продуктів**

Напрямок застосування	Зміст напрямку
Нанобіосенсори та наносенсори	Забезпечують швидкий аналіз і можливість моніторингу в режимі реального часу
Активне та інтелектуальне пакування	Наноматеріали у складі пакування проявляють антимікробні властивості або виконують функцію індикаторів змін якості, що дозволяє контролювати безпечність продукту під час зберігання і транспортування

Продовження таблиці 1

Наноматеріали для детоксикації	Застосовуються для сорбції та зниження вмісту небезпечних сполук (важкі метали, мікотоксини, токсичні забруднювачі) у харчових продуктах і сировині без погіршення їх харчової цінності
Інтегровані системи моніторингу	Поєднання наносенсорів із цифровими та автоматизованими системами для постійного контролю

Джерело: сформовано авторами на основі (Kovalchuk, 2024; Онопрієнко & Онопрієнко, 2022; Kakimova та ін., 2023; Giussani & Riu, 2023).

Наносистеми знаходять практичне застосування у контролі фізико-хімічних показників якості харчових продуктів, зокрема кислотності, окиснювальної стабільності, вмісту летких сполук і змін складу газового середовища. Це створює передумови для більш точного контролю стану продуктів на етапах зберігання і транспортування (Jangid та ін., 2025).

Проте усталені методи оцінювання означених показників нерідко не дають потрібної прудкості та чутливості, особливо в ситуаціях масового виготовлення й стрімкого обороту продуктів харчування. Це стримує потенціал раннього знаходження ризикових чинників і вчасного вирівнювання виробничих процедур. З огляду на це з'являється цілком логічна потреба у запровадженні новітніх концепцій, спроможних гарантувати тривалу перевірку вирішальних аспектів якості.

Водночас інтеграція наноматеріалів у системи оцінки показників харчової продукції потребує дбайливої наукової перевірки, уніфікації методів вимірювання й обліку потенційних токсикологічних небезпек. Тому важливим є всебічний розгляд ролі нанотехнологій у формуванні та нагляді показників безпечності й якості харчових продуктів, а також окреслення шляхів їхнього подальшого зростання з огляду на вимоги регуляторних механізмів і засад охорони здоров'я споживачів.

Використання нанотехнологій дозволяє класифікувати контроль за харчовими продуктами та ключовими категоріями: біологічні, хімічні, фізико-хімічні та сенсорні показники (табл. 2).

Таблиця 2. **Нанотехнології, показники безпечності та якості харчової продукції**

Категорія показників	Мета контролю	Тип нанотехнологій	Показники
Біологічні	Виявлення патогенних мікроорганізмів	Наносенсори, нанобіосенсори	Кількість колонієутворюючих одиниць (КУО/г), наявність *E. coli*, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*
Хімічні	Виявлення токсинів, пестицидів, важких металів, алергенів	Наночастинки золота/срібла у біосенсорах	Концентрація свинцю, кадмію, ртуті; рівень пестицидів; залишки антибіотиків у молочних продуктах
Фізико-хімічні	Оцінка складу, свіжості та структурних властивостей	Наноматеріали для сенсорного аналізу	Пероксидне число жирів; кислотність (pH); вологість; вміст білка та вуглеводів
Сенсорні/інтелектуальне пакування	Моніторинг стану продукту під час зберігання і транспортування	«Розумне» пакування з нанокомпонентами	Зміна кольору пакування при псуванні; контроль кисню та вологості всередині упаковки; виявлення токсинів у продуктах

Джерело: сформовано авторами на основі (Kakimova та ін., 2023; Gulzar та ін., 2020).

Стрімкий розвиток нанотехнологій відчинив можливості для створення нових сенсорних рішень і рішень для пакування харчових продуктів, що вирішують багаторічні негаразди в харчовому секторі стосовно подовження терміну придатності, зменшення втрат, оцінки безпеки та підвищення якості харчових продуктів. Наноматеріали можуть бути використані для посилення механічної міцності, покращення газобар'єрних властивостей, підвищення водовідштовхувальних властивостей, а також забезпечення антимікробної та поглинаючої активності харчової упаковки. Вони можуть бути включені до складу хімічних і біологічних датчиків, що дозволяє розробляти швидкі та чутливі пристрої для оцінки свіжості та виявлення алергенів, токсинів або патогенних забруднювачів. У цьому огляді підсумовано останні дослідження щодо використання наноматеріалів у розробці: 1) (біо)сенсорних технологій для виявлення харчових і непоживних компонентів, антиоксидантів, домішок та токсикантів; 2) методів покращення бар'єрних та механічних властивостей харчової упаковки; 3) активної функціональної упаковки. Також наведено наслідки використання наноматеріалів у харчовому секторі для навколишнього середовища, здоров'я та безпеки, регулювання та сприйняття споживачами.

Систематизація сучасних рішень «розумного» пакування передбачає моніторинг стану продукту, можливість запобігати псуванню. У табл. 3 подано основні напрямки застосування нанотехнологій в упаковці харчових продуктів.

Таблиця 3. **Нанотехнології в упаковці харчових продуктів**

Вид нанотехнології	Мета використання	Показники/функції
Індикатори свіжості	Виявлення псування продукту	Зміна кольору при рості мікробів, виділенні токсинів
Контроль газового середовища	Моніторинг внутрішніх умов упаковки	Рівень кисню, вологи, CO_2
Антимікробне покриття	Запобігання росту бактерій на поверхні продукту	Використання наночастинок срібла, цинку для інгібування мікроорганізмів
Розумні етикетки/сенсори	Відстеження умов транспортування і зберігання	Моніторинг температури, герметичності, механічних пошкоджень упаковки

Джерело: сформовано авторами на основі (Ahmad та ін., 2024; Dimopoulou та ін., 2026; Mustafa & Andreescu, 2020).

Пакування численних харчових продуктів поліпшується завдяки нанотехнологіям. Нові нанопакування для харчових продуктів набувають ексклюзивних властивостей, тобто вони здатні знищувати мікроби, наявні у харчових речовинах. Наноматеріали, що використовуються для пакування харчових продуктів, покращують їхню життєздатність, не викликаючи небажаних змін у характеристиках продуктів. Наночастинки також використовуються для наноупаковки харчових речовин. Таке застосування нанотехнологій дає рішення, призначені для упаковки харчових продуктів, шляхом модифікації проникнення фольги, збільшення механічних, хімічних і мікробних бар'єрних ефектів, а також стійкості до нагрівання.

Бажаний пакувальний матеріал повинен мати газо- та вологопроникність у поєднанні з міцністю та біорозкладаністю. «Нанорозумна» та «активна» харчова упа-

ковка має низку переваг порівняно з традиційними методами упаковки, від забезпечення кращого пакувального матеріалу з покращеною механічною міцністю, бар'єрними властивостями, антимікробними плівками до наносенсорики для виявлення патогенів та оповіщення споживачів про стан безпеки харчових продуктів.

Сьогодні наноносії застосовуються як системи вивільнення харчових домішок у харчових продуктах без порушення їхньої початкової будови. Розмір частинок може безпосередньо впливати на перенесення будь-якої біоактивної речовини до різних зон тіла, оскільки було помічено, що в певних клітинних культурах лише субмікронні наночастинки можуть вправно поглинатися, але не мікрочастинки більшого розміру. Оптимальна система вивільнення повинна мати такі характеристики:

- здатна доставляти активну субстанцію точно у цільове місце;
- забезпечувати наявність у цільовий час та з певною швидкістю;
- ефективно утримувати активні речовини на належному рівні протягом тривалого часу (в умовах зберігання).

Використання нанотехнологій у харчовій промисловості є одним із перспективних напрямків підвищення якості та безпечності продуктів. Кожна з галузей харчової промисловості (молочна, м'ясна, рибна, фруктова, овочева та ін.) має свої специфічні вимоги до контролю продуктів. У табл. 4. систематизовано використання нанотехнологій для різних галузей харчової промисловості із зазначенням показників контролю безпечності та якості харчових продуктів.

Таблиця 4. **Використання нанотехнологій за галузями харчової промисловості**

Галузь	Використання нанотехнологій	Показники контролю
Молочна продукція	Нанобіосенсори для виявлення патогенів (*Listeria*, *Salmonella*). Сенсори для визначення залишків антибіотиків. Наноматеріали для оцінки свіжості та окиснення жирів	Кількість КУО/г. Рівень антибіотиків. Пероксидне число, кислотність, вологість
М'ясна продукція та ковбаси	Наносенсори для виявлення бактерій і токсинів. Інтелектуальне пакування для моніторингу свіжості. Антимікробні нанопокриття	КУО/г, наявність патогенів. Вологість, pH. Показники псування (амінні сполуки, запах)
Риба та морепродукти	Нанобіосенсори для визначення гістаміну. Сенсори свіжості в упаковці. Наноматеріали для контролю токсинів і важких металів	Концентрація гістаміну. Вміст свинцю, ртуті. Температурний і газовий контроль упаковки
Овочі та фрукти	Наносенсори для виявлення пестицидів і мікробного забруднення. Розумне пакування для контролю вологості та свіжості. Нанопокриття для запобігання росту грибків	Рівень пестицидів. КУО/г. Вологість, показники псування

Продовження таблиці 4

Хлібобулочні та кондитерські вироби	Наносенсори для визначення мікробіологічних забруднень. Сенсори для моніторингу вологості та цукру. Наноматеріали для подовження терміну зберігання	КУО/г, наявність плісняви. Вологість. Органолептичні показники (свіжість, текстура)
Напої (безалкогольні та соки)	Нанобіосенсори для контролю мікробіології та цукру. Сенсори для оцінки рівня газів та окиснення. Інтелектуальна упаковка для відстеження свіжості	КУО/мл. Рівень цукру та кисню. Пероксидне число, смак, запах

Джерело: сформовано авторами на основі (Онопрієнко & Онопрієнко, 2022; Ghosh та ін., 2022; Poeta та ін., 2023; Bodkhe та ін., 2024).

Kuchipudi та ін. (2024) використали статистичні дані для побудови обізнаності респондентів про нанотехнології. Рис. 1. підтверджує висновок про те, що для тих, хто більше обізнаний з нанотехнологіями, немає жодного впливу на відчуття споживачами безпечності харчових продуктів.

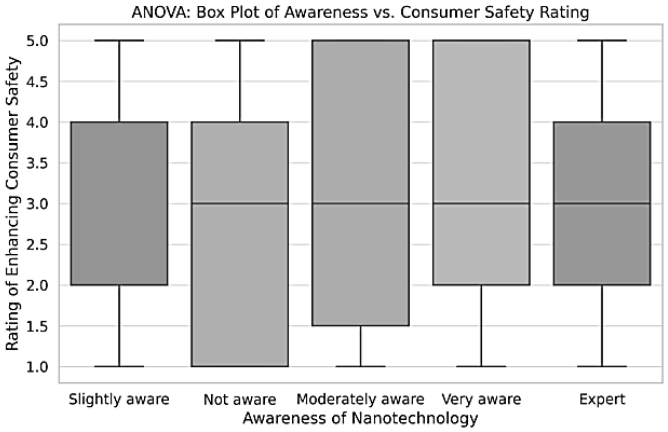

Рис. 1. Розподіл оцінок підвищення безпеки споживачів залежно від різних рівнів обізнаності з нанотехнологіями (Kuchipudi та ін., 2024)

Потім було проведено Т-тест для порівняння віри у здатність нанотехнологій покращувати продовольчу безпечність між групами з високим і низьким рівнем обізнаності з технологією (рис. 2).

Наноматеріали, які використовують для контролю якості харчових продуктів, класифікують за їхнім хімічним складом, функціональним призначенням і механізмом дії. Такий підхід дає змогу систематизувати їхнє використання у сенсорних, пакувальних та аналітичних системах (табл. 5).

За механізмом дії розрізняють наноматеріали, що базуються на оптичних ефектах (плазмонний резонанс), електрохімічних властивостях або сорбційній здатності. Саме комбінація цих механізмів забезпечує високу точність і оперативність контролю якості харчових продуктів.

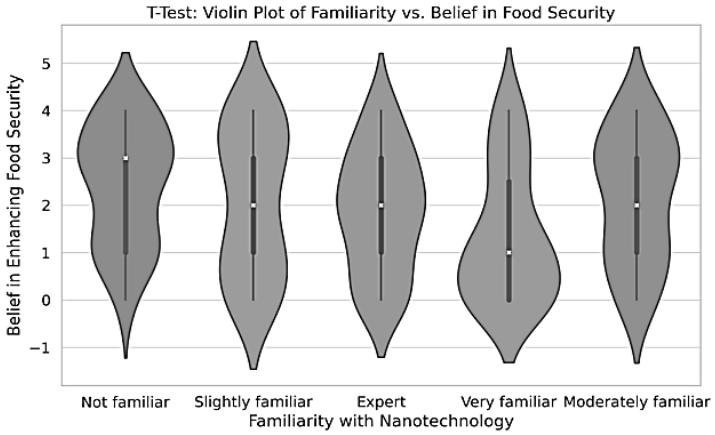

Рис. 2. Розподіл переконань щодо нанотехнологій, які покращують безпечність харчових продуктів, сегментована за ступенем обізнаності з нанотехнологіями (Kuchipudi та ін., 2024)

Таблиця 5. **Класифікація наноматеріалів для контролю якості харчових продуктів**

Ознака класифікації	Група наноматеріалів	Характерні властивості	Приклади та засоби для контролю якості
За хімічною природою	Металеві наночастинки (Ag, Au)	Антимікробна дія, плазмонні оптичні властивості	Індикатори мікробного псування, сенсорні платформи
	Оксидні наноматеріали (ZnO, TiO_2)	Фотокаталітична активність, хімічна стабільність	Активна упаковка, контроль окиснення
	Вуглецеві наноструктури (CNT, графен)	Висока електропровідність, механічна міцність	Електрохімічні сенсори якості
	Полімерні та біополімерні наноматеріали	Біосумісність, здатність до функціоналізації	Інкапсуляція, біосенсорні системи
За функціональним призначенням	Сенсорні	Висока чутливість до хімічних змін	Контроль свіжості, виявлення метаболітів
	Антимікробні	Інгібування росту мікроорганізмів	Подовження терміну зберігання
	Бар'єрні	Зменшення проникності газів і вологи	Захисне пакування
	Індикаторні	Зміна кольору або сигналу	Візуальна оцінка якості
За механізмом дії	Оптичні	Плазмонний резонанс, флуоресценція	Швидка індикація змін якості
	Електрохімічні	Зміна електричних параметрів	Кількісний аналіз якості
	Сорбційні	Вибіркове зв'язування сполук	Виявлення домішок і контамінантів

Джерело: сформовано авторами на основі **(**Abdullah & Alwan, 2025; Zhu, 2025; Prempeh та ін., 2025; Masood та ін., 2024; Ozcakir, 2023).

Наноматеріали та наносенсори відіграють провідну роль у сучасних системах контролю показників якості харчових продуктів. Завдяки унікальним фізико-хі-

мічним властивостям наноматеріалів стає можливим виявлення змін якості на початкових стадіях ще до появи помітних ознак псування (рис. 3).

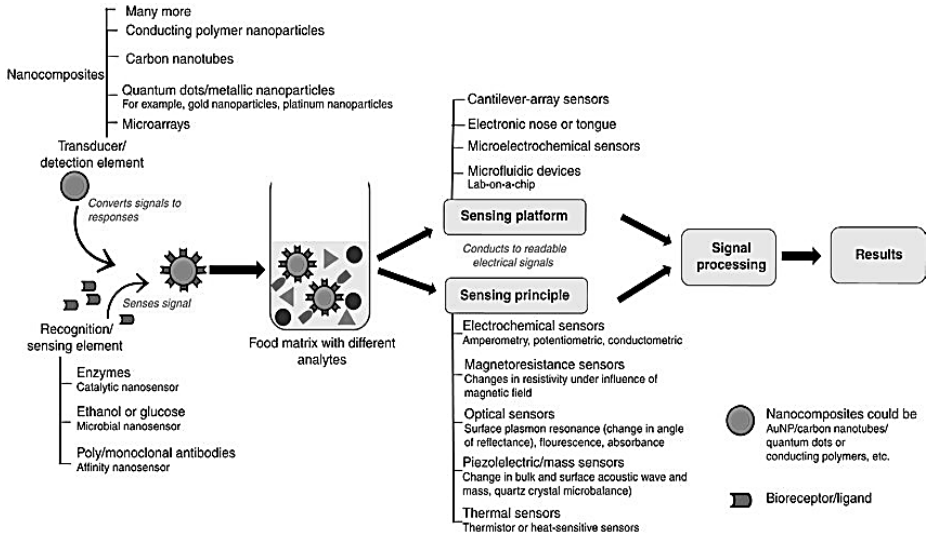

Рис. 3. Роль нанотехнологій у сенсорах для оцінки безпечності та якості харчових продуктів (Jangid та ін., 2025)

Важливою є роль нанотехнологій у мініатюризації та мобільності сенсорних систем. Наноматеріали дозволяють виготовляти компактні, портативні сенсори, придатні для застосування безпосередньо на виробництві, у торговельних мережах або під час перевезення продукції. Це сприяє переходу від періодичного лабораторного контролю до постійного моніторингу якості та безпечності харчових продуктів. (Kuchipudi та ін., 2024). Такі рішення особливо важливі для систем НАССР, де швидкість ухвалення рішень має вирішальне значення для уникнення ризиків. Окрім того, нанотехнології жваво використовуються у «розумних» пакувальних сенсорах, інтегрованих безпосередньо у пакування харчових товарів. Наноіндикатори здатні реагувати на зміну температури, пошкодження герметичності, накопичення газів чи розбудову мікрофлори, сповіщаючи про погіршення якості продукту (Jose, 2024). Це збільшує прозорість харчового ланцюжка та гарантує додатковий рівень захисту покупців, даючи змогу вчасно знаходити небезпечну продукцію.

Напрямки застосування наносенсорів представлено у табл.6.

Таблиця 6. **Нанотехнології у сенсорах для оцінки безпечності та якості харчових продуктів**

Напрямок застосування наносенсорів	Типи наноматеріалів	Призначення сенсорів	Переваги використання нанотехнологій
Мікробіологічний контроль	Вуглецеві нанотрубки, графен, наночастинки золота	Виявлення патогенних мікроорганізмів (*Salmonella*, *Listeria, E. coli*)	Висока чутливість, швидке отримання результатів, можливість безлабораторного аналізу

Продовження таблиці 6

Біосенсори для токсинів та алергенів	Наночастинки срібла, квантові точки, полімерні наноструктури	Визначення мікотоксинів, харчових алергенів, бактеріальних токсинів	Висока селективність, зниження межі виявлення, стабільність сигналу
Хімічні сенсори контамінантів	Оксиди металів (ZnO, TiO_2), магнітні наночастинки	Контроль пестицидів, антибіотиків, важких металів	Точність аналізу в складних харчових матрицях, мінімальна підготовка проб
Оптичні наносенсори якості та свіжості	Наночастинки золота, квантові точки	Оцінка свіжості м'яса, риби, молочних продуктів	Візуальна індикація, можливість контролю в реальному часі
Газові сенсори псування продуктів	Наноструктуровані напівпровідники, графен	Виявлення аміаку, сірководню, летких амінів	Раннє виявлення псування, висока швидкість реакції
Сенсори температурних порушень	Полімерні нанокомпозити, нанокапсули з барвниками	Контроль дотримання умов зберігання та транспортування	Простота використання, інтеграція в пакування
«Розумне» пакування з наносенсорами	Наноглини, наночастинки срібла, біонаноматеріали	Моніторинг якості продукту протягом усього терміну зберігання	Безперервний контроль, підвищення довіри споживачів
Портативні сенсорні системи	Графен, наночастинки металів	Експрес-аналіз безпечності на виробництві та в торгівлі	Мобільність, економія часу та ресурсів
Інтегровані системи HACCP	Комбіновані наноматеріали	Моніторинг критичних контрольних точок	Підвищення ефективності управління ризиками
Оцінка ризиків та безпечності сенсорів	Біосумісні наноматеріали	Контроль стабільності та міграції наночастинок	Відповідність регуляторним вимогам, безпека для споживачів

Джерело: сформовано авторами на основі (Gulzar та ін., 2020; Masood та ін., 2024; Yadav & Pandey, 2024).

Інтеграція наносенсорних систем у контрольні схеми дає змогу здійснювати неперервний нагляд якості харчових продуктів у режимі реального часу, що є особливо значущим на етапах зберігання й транспортування (Kakimova та ін., 2023).

Поєднання стандартних мікроелектронних процесів з технологіями мікрообробки кремнію відкрило шлях для виготовлення у великій кількості та за низькою ціною пристроїв з більшою кількістю ступенів свободи та більшою кількістю принципів перетворення у їхній взаємодії з навколишнім середовищем, що призвело до появи величезної різноманітності розумних датчиків, виконавчих механізмів та систем, які використовують переваги масштабування, що виникають при переході від макро- до мікрорівня.

Важливо зазначити, що мікро(нано)системи, побудовані за вищезазначеним

принципом, тобто за відомим як низхідний підхід, отримують вигоду від масштабної економії, типової для мікроелектроніки: хоча обладнання та процеси є дорогими, все підготовлено для обробки десятків великих кремнієвих пластин, кожна з яких містить сотні чіпів, тому вартість одиниці може бути як завгодно низькою, якщо обробляються великі обсяги. Також розробляються та досліджуються нові матеріали, які перевершують властивості або можливості кремнієвих пристроїв: полімери, скло, кераміка, текстиль тощо; для масового виробництва необхідно розробити належні методи реплікації. Щось подібне відбувається з мікро(нано)системами, побудованими за висхідним підходом, де системи будуються з найменших будівельних блоків (наприклад, молекул) за допомогою різноманітних штучно керованих, але здебільшого природних процедур самозбірки.

Одним з найбільш імовірних практичних напрямків є використання нанотехнологій у «розумному» пакуванні харчових товарів (Masood та ін., 2024).

Упаковка харчових продуктів є важливим елементом процесу виробництва харчових продуктів, оскільки вона захищає продукти від зовнішніх змінних, таких як температура, вологість, мікробіологічна інфекція, навколишні газоподібні суміші, захист від розливів і темперування (Упаковка нанотехнології). Упаковка є важливою частиною кожного етапу процесу виробництва харчових продуктів, проте проникна/пориста природа традиційних матеріалів для упаковки харчових продуктів є фундаментальним недоліком. Не існує пакувальних матеріалів, які були б повністю непроникними для водяної пари та інших навколишніх газів. Що стосується упаковки, нанотехнології забезпечують безпечність харчових продуктів, запобігаючи розкладанню та втраті поживних речовин, що призводить до збільшення терміну придатності.

Розвиток екологічно чистої та стійкої упаковки має потенціал для зменшення шкідливих екологічних наслідків, спричинених штучною упаковкою, за допомогою біорозкладаних компонентів, нанокомпозитних матеріалів і рослинних екстрактів. Застосування нанотехнологій у харчовій упаковці постійно розвивається завдяки розширеній функціональності наноструктурованих металів, неметалів та їх оксидів. Наразі досліджується пряме використання нанотехнологій у харчових продуктах та напоях, однак непряме використання в упаковці харчових продуктів вже запроваджено.

Консерванти, ароматизатори, інкапсульовані харчові інгредієнти, антимікробні засоби, пакувальні компаунди, інші наночастинки та нанорозмірні харчові добавки використовуються для впливу на харчову цінність та збільшення терміну придатності продукту, аромату, текстури тощо, а також можуть бути використані для виявлення харчових патогенів, які дають підказки щодо стандартів якості харчових продуктів. Нанотехнології широко використовуються в консервуванні харчових продуктів, харчових добавках та упаковці харчових продуктів як антимікробні сполуки (зокрема, Cu/CuO, Ag, MgO, TiO_2, ZnO, вуглецеві точки, мезопористі частинки та графен тощо). Порівняно з традиційними методами упаковки, нанотехнології мають ряд переваг, включаючи покращений механічний бар'єр, термостійкі властивості та біорозкладаність.

Недостатність інформації у юристів про нанотехнології та наноматеріали спричиняє те, що наразі майже неможливо окреслити юридичну конструкцію механізму правового урегулювання взаємин, пов'язаних із нанотехнологіями. З одного

боку, є предмет регулювання з розмитими межами, з іншого — спостерігається його невпинний розвиток і вдосконалення. Це веде до того, що законодавець або не встигає законодавчо закріпити ситуацію регулювання певних взаємин, пов'язаних із нанотехнологіями, або намагається застосовувати невластиві для цього об'єкта засоби і методи правового врегулювання.

На міжнародному рівні регулювання безпечності харчових продуктів загалом будується на основі міжнародних стандартів та угод, таких як Кодекс Аліментаріус, вимоги Європейського Союзу та практики Управління з контролю за продуктами і ліками США (FDA) (Приліпко та ін., 2025).

EFSA наголошує на важливості оцінювання безпеки наноматеріалів у харчових продуктах і пакувальних матеріалах (Упаковка нанотехнології).

В Україні нормативно-правове регулювання безпечності та якості харчових продуктів загалом визначається загальнодержавними законами й актами, що встановлюють вимоги до всього харчового сектору. Закон України «Про захист прав споживачів» та інші галузеві норми спрямовані на забезпечення захисту життя і здоров'я споживачів через встановлення вимог до безпечності продукції, але вони не містять спеціальних норм щодо нанотехнологій як таких.

Зростаючі вимоги до якості та безпеки харчових товарів потребують нових технічних рішень, які гарантують швидку, точну та згуртовану перевірку. Нанотехнології показують значний потенціал у зміні підходів до нагляду за безпечністю продукції на всіх етапах харчового ланцюга — від виготовлення до споживання (Dimopoulou та ін., 2026).

Ще однією багатообіцяючою галуззю є суміщення нанотехнологій із цифровими засобами, включно з IoT, штучним інтелектом та блокчейн-системами для самостійного аналізу відомостей і передбачення чинників якості (Jangid та ін., 2025).

Харчова інженерія постійно стикається з випадками харчових захворювань. Харчові захворювання визначаються як захворювання, які зазвичай є заразними або смертельними за своєю природою, що ініціюються медіаторами, які потрапляють в організм через перетравлення їжі. Організмами, що сприяють цьому, можуть бути бактерії, найпростіші та віруси, грибкові або бактеріальні токсини, пестициди та іони металів. Деякими патогенами, пов'язаними з основними харчовими захворюваннями, є *Bacillus cereus*, *Brucella*, *Campylobacter jejuni*, *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhi*, *S. paratyphi*, *Shigella* spp., *Staphylococcus aureus*, *Vibrio cholerae ma V. Parahaemolyticus*. Для управління випадками харчових захворювань важливо розробити економічно ефективні та прості методи миттєвої ідентифікації патогенного забруднення або наявності токсичних речовин, які можуть замінити традиційні методи тестування. Методи, засновані на ПЛР, та процедури на основі імуноферментного аналізу є традиційними та регулярно застосовуються.

Немає сумнівів, що ці методи є науковими, але існує потреба в дорогих інструментах та хімічних компонентах, кваліфікованих людських ресурсах, значних обсягах підготовки зразків і тривалих процесах, пов'язаних з цими молекулярними методами, що призупиняє профілактичне лікування пацієнтів. Існує нагальна потреба в розробці унікальних методів, які будуть простими у використанні, швидкими, недорогими та делікатними для розпізнавання в певних місцях, а також для стабільних і рухомих наборів для зондування.

У світовому масштабі регулювання харчових продуктів та пакувальних матеріалів з використанням нанотехнологій значно варіюється, що відображає різні підходи до оцінки ризиків. У Сполучених Штатах FDA керує цими матеріалами відповідно до існуючих норм для харчових добавок та матеріалів, що контактують з харчовими продуктами, загалом дотримуючись принципу «суттєвої еквівалентності», якщо не виникають нові проблеми безпеки. Натомість Європейський Союз урегульовує нові наноматеріали, що стикаються з харчовими продуктами, відповідно до Регламенту № 1935/2004 та відповідних настанов Європейської агенції з безпеки харчових продуктів (EFSA), які вимагають передринкового дозволу та подання вичерпних відомостей, включно з фізико-хімічною характеристикою, дослідженнями міграції та токсикологічними даними.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання наноматеріалів із RFID-технологіями та елементами Інтернету речей (IoT).

На нашу думку, особливу цінність нанотехнологій становить можливість інтегрувати моніторинг безпечності безпосередньо у виробничі й логістичні системи. У результаті контроль мікробіологічного стану, наявності небезпечних домішок, показників свіжості та стабільності здійснюється на постійній основі, а не епізодично. З практичної точки зору це створює передумови для скорочення втрат продукції, більш точного управління технологічними режимами та формування стійкої довіри споживачів до якості харчових продуктів.

Висновки

Беручи до уваги вищезазначені властивості наноматеріалів, окрім значної кількості позитивного потенціалу, їх застосування може спричинити шкоду людині та її здоров'ю. Використання нанотехнологій і, як наслідок, виготовлення нових матеріалів та виробів постійно триває. З огляду на це, в недалекому майбутньому виникатимуть нові проблеми, пов'язані з винайденням нових нанопристроїв. Зазначене свідчить як про досить широкий спектр вживання нанотехнологій та наноматеріалів, так і про велике розмаїття відносин, які постають у зв'язку з їх використанням, а створення наноматеріалів у межах виникнення, зміни чи припинення викликають появу проблем їх правового унормування.

Водночас з'ясовано, що широке запровадження нанотехнологій стримується недостатнім вивченням токсикологічних ефектів наночастинок, здатністю їх міграції з пакувальних виробів у харчові матриці та відсутністю єдиної міжнародної нормативно-правової бази. Наявні розробки свідчать про потребу в комплексному визначенні ризиків протягом усього життєвого циклу наноматеріалів — від виготовлення до утилізації.

Перспективним напрямком є розробка стандартизованих протоколів застосування наноматеріалів у харчовій промисловості з огляду на їх можливу міграцію з паковання у вміст. Особливу увагу слід надати довготривалим токсикологічним вивченням наночастинок срібла, оксиду цинку та діоксиду титану, які найчастіше використовуються в антимікробних пакувальних матеріалах.

Окремим завданням є пристосування нанотехнологічних рішень до умов малих і середніх підприємств шляхом створення економічно досяжних сенсорних платформ і блокових пакувальних систем. Паралельно доречно запроваджувати цифрові платформи збирання та аналізу даних із наносенсорів, що гарантуватиме формування єдиного інформаційного поля контролю якості.

Фінансування досліджень

Дослідження виконано без фінансової підтримки.

Етичні аспекти

Етичне схвалення не вимагалося, оскільки дослідження має теоретичний характер.

Література

Гнатюк В., Расторгуєва І., & Пшенична, Н. (2024). Перспективи використання нанотехнологій у біологічних дослідженнях нового покоління. *Нотатки сучасної біології*, 1(7), 37—42. https://doi.org/10.29038/NCBio.24.1-6.

Кушнірук, В. С., & Циганкова, Є. О. (2024). Нанотехнології у харчовій промисловості. Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції *«Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових виробництв»*, 56—58. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/19967/1/zbirnykmatkonfht241224-56-58.pdf.

Онопрієнко, О. В., & Онопрієнко, О. М. (2022). Нанотехнології у харчових продуктах. Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції *«Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії»*. вид. ФОП Гордієнко Є. І., Черкаси. https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4241.

Приліпко, Т. М., Богатко, Н. М., Богатко, А. Ф., Руснак, Л. В., & Вакуленко, Н. О. (2025). Аналіз міжнародного законодавства щодо харчової безпеки. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, 2(47), 205—210. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-2.29.

Старинський, М. В., Миргород-Карпова, В. В., & Шлапко, Т. В. (2021). Проблеми правового регулювання використання нанотехнологій у медичній галузі. *Науковий вісник публічного та приватного права*, 5(1), 76—82. https://doi.org/10.32844/2618-1258.2021.5.1.14.

Томаля, Т., Прилепа, Н., & Рогова, А. (2023). Ключові аспекти забезпечення якості та безпечності харчових продуктів у ресторанному бізнесі. *Development Service Industry Management*, (3), 102—106. https://doi.org/10.31891/dsim-2023-3(15).

Упаковка нанотехнології. https://www.ctec.lv/ua/evropeyska-ce-sertifikaciya/materiali-kontaktuyut-harchovimi-produktami/upakovka-nanotekhnologii.

Abdullah, R. S. M., & Alwan, A. Y. (2025). A review of nanochemistry and nanotechnology applications in the food industry. *Journal of Current Research in Food Science*, 6(1), 47—54. https://doi.org/10.22271/foodsci.2025.v6.i1a.184.

Ahmad, K., Li, Ya., Tu, Ch., Guo, Yu., Yang, X., Xia, Ch., Hou, H. (2024). Nanotechnology in food packaging with implications for sustainable outlook and safety concerns. *Food Bioscience*, 58, 103625. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103625.

Bodkhe, M., Chalke, T., Kulkarni, S., Goswami, A. (2024). A Review on Sustainable Applications of Nanobiosensors in Various Fields and Future Potential. *BioNanoScience*, 14(2), 1940. https://doi.org/10.1007/s12668-024-01344-w.

Boro, P. R., Borthakur, P. P., & Baruah, E. (2025). Advancements in Optical Biosensor Technology for Food Safety and Quality Assurance. *Engineering Proceedings*, 106(1), 6. https://doi.org/10.3390/engproc2025106006.

Dimopoulou, M., Graikou, K., Chinou, I., & Gortzi, O. (2026). A Review of Nanotechnology in Food, Smart Packaging and Potential Public Health Impact. *Applied Sciences*, 16(1), 168. https://doi.org/10.3390/app16010168.

Elkader, M. F. A., Almogbel, M. S., & Elabbasy, M. T. (2020). Survival and reduction in foodborne bacteria using methyl cellulose film doped with europium oxide nanoparticles. *Food Science & Nutrition*, 8, 291—298. https://doi.org/10.1002/fsn3.1305.

Ghimpeteanu, G., Rajani, H., Quintanaa, J., & Garcia, R. (2025). Hyperspectral Imaging for Identifying Foreign Objects on Pork Belly. *Sensors*, 25(22), 7015. https://doi.org/10.3390/s25227015.

Ghosh, T., Raj, G. V. S. B., Dash, K. K. (2022). A comprehensive review on nanotechnology based

sensors for monitoring quality and shelf life of food products. *Measurement: Food*, 7, 100049. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100049.

Giussani, B., & Riu, J. (2023). Biosensors and Smart Analytical Systems in Food Quality and Safety: Status and Perspectives. *Foods*, 7, 12(12):2292. https://doi.org/10.3390/foods12122292. PMID: 37372503; PMCID: PMC10296890.

Gulzar, S., Raju, N., Nagarajarao, R. Ch., Benjakul, S. (2020). Oil and pigments from shrimp processing by-products: Extraction, composition, bioactivities and its application. *A review, Trends in Food Science & Technology*, 100, 307—319, 0924—2244. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.005.

Islam, F., Imran, A., Afzaal, M., Zahoor, T., Amjad, N., Wei, C. R., ..., Asif Shah, M. (2024). Nanotechnology for the improvement of the quality, properties, and safety of food and agriculture: recent and future trends. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1). https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2398857.

Ivanov, A., Buruiana, D. L., Trus, C., Ghisman, V., & Antoniac, I. V. (2025). Nanomaterials for Sensory Systems — A Review. *Biosensors*, 15(11), 754. https://doi.org/10.3390/bios15110754.

Jangid, H., Panchpuri, M., Dutta, J., Joshi, H. C., Paul, M., Karnwal, A., Ahmad, A., Alshammari, M. B., Hossain, K., Pant, G., & Kumar, G. (Jun 25, 2025). Nanoparticle-based detection of foodborne pathogens: Addressing matrix challenges, advances, and future perspectives in food safety. *Food Chem. X.*, 29:102696. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102696.

Javed, M., Shah, A., Nasir, S., Pervaizc, S., & Hussain, H. (2025). Emerging nano sensing technologies for the detection of biological and chemical food toxins. *RSC Advances*, 50, 42771—42842. https://doi.org/ 10.1039/d5ra06960b.

Jose, S. (2024). Nanotechnology in Food Science: Enhancing Safety, Quality and Nutrition. *Journal of Nanosciences: Current Research*, 9:02. https://www.hilarispublisher.com/open-access/nanotechnology-in-food-science-enhancing-safety-quality-and-nutrition.pdf.

Kakimova, Z., Orynbekov, D., Zharykbasova, K., Kakimov, A., Zharykbasov, Y., Mirasheva, G., Toleubekova, S., Muratbayev, A., & Ntsefong, G. N. (2023). Advancements in nano bio sensors for food quality and safety assurance — a review. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 17, 728—747. https://doi.org/10.5219/1903.

Kovalchuk, Y. (2024). Modern Analytical Methods for Ensuring Food Quality and Consumer Safety. World conference on future innovations and sustainable solutions. *Futurity Research Publishing*, 1. https://doi.org/10.5281/zenodo.14030840.

Kuchipudi, J. D., Selma, Dr. F., Mumtaz, M. A., Hussein, H. S., Kashif, M., & Mercado, G. M. (2024). Application of nanotechnology in food safety and agriculture: smart packaging and delivery systems for enhanced food security. *South Eastern European Journal of Public Health*, XXIV, S4. https://files01.core.ac.uk/download/pdf/658903559.

Kumar, A., Choudhary, A., Kaur, H., Mehta, S., & Husen, A. (2021). Metal-based nanoparticles, sensors, and their multifaceted application in food packaging. *Journal of Nanobiotechnology*, 19, 256. https://doi.org/10.1186/s12951-021-00996-0.

Kusuma, H. S., Yugiani, P., Himana, A. I., Aziz, A., & Putra, D. A. W. (2023). Reflections on food security and smart packaging. *Polymer Bulletin*, 81(1), 87—133. https://doi.org/10.1007/s00289-023-04734-4.

Masood, M., Albayouk, T., Saleh, N., El-Shazly, M., & El-Nashar, H. A. S. (2024). Carbon nanotubes: a novel innovation as food supplements and biosensing for food safety. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1381179. https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1381179.

Mustafa, F., Andreescu, S. (2020). Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. *RSC Adv*., 10(33):19309—19336. https://doi.org/10.1039/d0ra01084g.

Ngangom, L., Begum, J. S., Gautam, S., Venugopal, D., & Joshi, S. (2024). Nanotechnology in Food Crop Production and Food Processing Industry. *In Food Production, Diversity, and Safety Under Climate Change*, 235—247. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51647-4_20.

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(1), 45. https://doi.org/10.1007/s40820-020-0383-9.

Ozcakir, G. (2023). Applications of Nanomaterials in Food Industry: A Review. *Materials Proceedings*, 14(1), 22. https://doi.org/10.3390/IOCN2023-14470.

Poeta, E., Liboà, A., Mistrali, S., Núñez-Carmona, E., & Sberveglieri, V. (2023). Nanotechnology and E-Sensing for Food Chain Quality and Safety. *Sensors*, 23(20), 8429. https://doi.org/10.3390/s23208429.

Prempeh, N. Y. A., Nunekpeku, X., Kutsanedzie, F. Y. H., Murugesan, A., & Li, H. (2025). A Comprehensive Review of Non-Destructive Monitoring of Food Freshness and Safety Using NIR Spectroscopy and Biosensors: Challenges and Opportunities. *Chemosensors*, 13(11), 393. https://doi.org/10.3390/chemosensors13110393.

Qi, C., Zhang, Y., & Tu, J. (2022). Facile synthesis of ε-poly-L-lysine-conjugated ZnO@PDA as photothermal antibacterial agents for synergistic bacteria killing and biofilm eradication. *Biochemical Engineering Journal*, 186, 108569. https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108569.

Rafi, Z., Khan, H., Husain, A., Khanam, A., Alafnan, A., Alobaida, A., Shahab, U., Ahmad, I., & Ahmad, S. (2025). Food contamination and the emerging application of nanobiosensors in food safety. *Journal of Food Science*, 90(2):e70073. https://doi.org/10.1111/1750-3841.70073.

Suthar, T. R., Gavane, A. B., Shah, A. Y., Devkatte, A. N. (2020). Nanotechnology, a Revolutionary Technique in the Food Industry: Systematic Review. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 8(X). http://dx.doi.org/10.7770/safer-V0N0-art2256.

Wahab, Ya. A., Al-Ani, L. A., Khalil, I., Schmidt, S., Tran, N. N., Escribà-Gelonch, M., Woo, M. W., Davey, K., Gras, S., Hessel, V., Julkapli, N. M. (2024). Nanomaterials: A critical review of impact on food quality control and packaging. *Food Control*, 163, 110466, https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110466.

Yadav, G., & Pandey, A. K. (2024). Scope of Nanotechnology in Smart Packaging Systems. *In Advances in Sustainable Food Packaging Technology*, 161—192. Apple Academic Press. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003395249-10/scope-nanotechnology-smart-packaging-systems-gaurav-yadav-anand-kumar-pandey.

Zhu, S. (2025). Nanotechnology on the Food Industry: Applications and Challenges. *Applied and Computational Engineering*, 122, 123—128. https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.1970.