

# СТАБІЛІЗАЦІЯ ДОПОВАНИХ ТИТАНОВМІСНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ У РАМКАХ СКРИНІНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОТЕНЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ДЛЯ ПРАЦЮЮЧИХ І ДОВКІЛЛЯ

Демешька О. В., Белюга О. Г., Мовчан В. О., Патица Т. І., Цапко В. Г.

Державна установа «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва  
Національної академії медичних наук України», м. Київ

*Вступ.* Допованість важкими металами може підвищувати вихідну токсичність наноматеріалу, а отже – негативно впливати на здоров'я працюючих і спричиняти забруднення об'єктів довкілля.

*Мета дослідження.* Проаналізувати дисперсність гідрозолів нанопорошків допованих титановмісних наноматеріалів у різних середовищах і обґрунтувати доцільність певних стабілізаторів для серії скринінгових досліджень потенційної небезпеки.

*Матеріали та методи дослідження.* Оцінено розмірність комплексу діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ), допованого сріблом (Ag) (нанокомпозит  $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ , масова частка Ag ~ 4 %), комплексу  $\text{TiO}_2$ , допованого Ag (нанокомпозит  $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ , масова частка Ag ~ 8 %), і нанопорошку  $\text{TiO}_2$  у різних середовищах/стабілізаторах. Розмір частинок визначали методом динамічного розсіювання світла за допомогою приладу «Analysette 12 DynaSizer» (Fritsch, Німеччина).

*Результати.* Стабілізація титановмісних нанопорошків глюкозо-цитратним буфером дозволяє отримувати відносно стабільні гідрозолі, що можуть бути використані в скринінгових дослідженнях *in vitro* зі застосуванням як тест-об'єкт сперматозоїдів великої рогатої худоби. Для досліджень фіто- та антибактеріальної токсичності доцільним є застосування нанопорошків у фізіологічному розчині.

*Висновки.* Необхідні поглиблені дослідження впливу додаткової допованості нанопорошків важкими металами на організм працюючих у сфері нанотехнологій і об'єкти довкілля.

**Ключові слова:** титановмісні наноматеріали, допування, стабілізація, скринінг, дисперсність

## Вступ

Протягом останнього десятиліття значна увага науковців була зосереджена на унікальних властивостях наноматеріалів, що є результатом обмеження квантового розміру та поверхневих ефектів. Зокрема, обмеження квантового розміру впливає на енергетичну структуру та фізичні властивості допованих (легованих) наноматеріалів і нанопристроїв. Своєю чергою, допування наноматеріалів забезпечує гнучкий спосіб налаштування властивостей матеріалів, зберігаючи при цьому високі площі поверхні. Очікується, що доповані наноматеріали зроблять значний внесок у нанотехнології для практичного застосування в галузях електроніки, фотоніки, оптики, медичних наук, внутрішньої безпеки тощо [1]. Допування різних матеріалів, особливо напівпровідників, відоме як потужний інструмент для поліпшення властивостей і пошуку доцільного застосування в промисловості, зокрема, у наноелектроніці та нанофотоніці [2]. Явища люмінесценції активно досліджуються в допованих

наночастинках з метою виявлення випромінювання, зокрема, у інфрачервоному детектуванні та дозиметрії. Люмінесцентні наночастинки ближнього інфрачервоного діапазону є особливо перспективними для біологічної візуалізації, оскільки за допомогою автофлуоресценції можна отримати більш високу роздільну здатність зображення. Доповані ізоляторні наноматеріали, включаючи вуглецеві нанотрубки, представляють новий тип високоефективного діагностичного люмінесцентного матеріалу. Як новий різновид біологічних маркерів ізоляторні наночастинки є менш токсичними, ніж напівпровідникові наночастинки, й є перспективними для виявлення, діагностики та лікування онкологічних захворювань.

Отже, допування є широко використовуваним методом модифікації наночастинок для посилення їхньої електричної, оптичної та біологічної активності [1]. Наприклад, наночастинки, леговані лантаноїдами, були розроблені як новий клас люмінесцентних наноматеріалів. На відміну від звичайних об'ємних люмінофорів, наночастинки забезпечують

зручну платформу для регулювання оптичного випромінювання та сприяють інтеграції з іншими функціональними групами, такими як біологічні молекули. Тож такі матеріали є перспективними в біо- та інформаційних технологіях, енергетиці тощо. Домішки допуючих (легуючих) речовин, такі як  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , рідкоземельні та перехідні елементи, відіграють важливу роль у зміні електронної структури, зокрема, щодо можливостей модуляції основного матеріалу. Також допуння може посилити протимікробний ефект [3]. Зокрема, срібло, леговане полімерним хітозаном та оксидом заліза, забезпечує високу антимікробну ефективність проти бактерій *E. coli*, *B. subtilis* і *S. aureus*. Своєю чергою, діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ), допований сріблом (Ag) і нітрогеном, може підвищити антибактеріальні властивості наночастинок  $\text{TiO}_2$  щодо *E. coli* та *B. subtilis* при опроміненні флуоресцентним світлом після культивування протягом 24 год. В іншому дослідженні наночастинок  $\text{TiO}_2$ , доповані Ag, також виявляли токсичну дію щодо бактерій *E. coli*. Композитне покриття  $\text{TiO}_2$  + Ag показало повне знищення метицилін-резистентного *S. aureus* протягом 24 год у всіх умовах культивування.

Таким чином, доповані титановмісні наноматеріали, зокрема, нанопорошок  $\text{TiO}_2$ , допований Ag, можуть сприяти знищенню патогенних мікроорганізмів і бути використані в дезінфекційних засобах. У той самий час слід зазначити, що допованість важкими металами може підвищувати вихідну токсичність наноматеріалу, а отже — спричинити забруднення навколишнього середовища та негативно впливати на здоров'я працюючих. Також слід зазначити, що дані обмеженого кола досліджень показують, що деякі наноматеріали можуть мати екотоксикологічні ефекти [4]. Токсикологічна поведінка наноматеріалів, що безпосередньо контактують з клітинами, залежить від їхнього хімічного складу, кількості, розчинності, форми, площі та заряду. Вплив може залежати від того, як довго наночастинок залишаються інтактними та як можуть акумулюватися в біосистемі. Домішки, що утворюються в процесі виробництва наноматеріалів, також впливають на їхню токсичність.

У той самий час, як і на початку розвитку нанотехнологій, розробка та впровадження нових матеріалів значно випереджають біомедичні дослідження потенційного небезпечного впливу наноматеріалів на організм людини та об'єкти довкілля. Своєю

чергою, проведення зазначених досліджень має ряд перешкод та ускладнень, що пов'язані з агрегатним станом речовини: значна кількість нових матеріалів представлена у вигляді нанопорошків, що актуалізує питання отримання стабільних гідрозолів нанопорошків для експериментальних досліджень у методах *in vitro* та вибору стабілізаторів, які не впливають на токсичність і біологічні властивості вихідного матеріалу.

*Мета дослідження* — проаналізувати дисперсність гідрозолів нанопорошків допованих титановмісних наноматеріалів у різних середовищах і обґрунтувати доцільність певних стабілізаторів для серії скринінгових досліджень потенційної небезпеки *in vitro*.

## Матеріали та методи дослідження

Оцінено розмірність комплексу  $\text{TiO}_2$ , допованого Ag (нанокмпозит  $\text{TiO}_2$  + Ag, масова частка Ag ~ 4 %), комплексу  $\text{TiO}_2$ , допованого Ag (нанокмпозит  $\text{TiO}_2$  + Ag, масова частка Ag ~ 8 %) і нанопорошку  $\text{TiO}_2$ , синтезованого методом термічного розкладу, у різних середовищах/стабілізаторах. Розмір частинок визначали методом динамічного розсіювання світла за допомогою приладу «Analysette 12 DynaSizer» («Fritsch», Німеччина).

## Результати та їх обговорення

Наночастинок  $\text{TiO}_2$  використовуються у виробництві широкого спектра продукції, що в кінцевому підсумку може створювати додаткове навантаження на екосистеми. Також відомо, що шкіра під впливом ультрафіолетового світла може бути значною мішенню для фотосенсибілізованого пошкодження комерційними нанопродуктами  $\text{TiO}_2$  у концентраціях 0,2–3,0 мг/мл [5].

Власними експериментальними дослідженнями встановлено, що нанокмпозит  $\text{TiO}_2$  + Ag (масова частка Ag ~ 4 мас. %) і нанопорошок  $\text{TiO}_2$  у концентраціях 3 мг/мл ініціюють патологічні зміни в сперматозоїдах великої рогатої худоби (бика), що є маркерами оксидативного стресу (аномалії головки, середньої частини та хвоста, а також відсутність акросоми тощо), при цьому патологічна дія нанокмпозиту  $\text{TiO}_2$  + Ag (4%) є більш вираженою [6].

Експериментальні дослідження в умовах *in vitro* показали, що під впливом  $\text{TiO}_2$  у концентрації 30 мг/мл на мононуклеарні клітини периферичної

крові спостерігаємо статистично значиме збільшення продукції IL-1. Натомість  $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$  у концентраціях 30 мкг/мл здатний підвищувати функціональну активність мононуклеарних клітин периферичної крові за продукцією прозапальних цитокинів IL-1, IL-6, TNF- $\alpha$  та продукцію IL-4 у донорів-добровольців, що свідчить про потенційний вплив на формування хронічного запалення та алергічних реакцій у відповідній категорії працівників нановиробництва [7]. Також представляють інтерес результати дослідження впливу титановмісних наноматеріалів на медоносних бджіл (*Apis mellifera*), оскільки вважають, що люди, які харчувалися продуктами бджільництва (пилком, прополіс тощо), зазнають впливу наночастинок. Значення  $\text{LC}_{50}$ , оцінені протягом 96 год, становили 5,865 мг/л для  $\text{TiO}_2$  та 312,845 мг/л для  $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$ . Концентраційною групою, яка мала найбільший внесок щодо рівня смертності, була концентрація 100 мг/л для  $\text{TiO}_2$ , порівняно з 10 мг/л для  $\text{Ag-TiO}_2$ . Токсичний ефект наночастинок  $\text{TiO}_2$  та  $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$  збільшувався разом зі збільшенням концентрації та часу експозиції [8].

Зазвичай титановмісні наноматеріали представлені у вигляді нанопорошків, що актуалізує питання щодо переведення їх у стабільні гідрозолі для досліджень *in vitro* та *in vivo* та відповідно пошуку адекватного стабілізатора. Для стабілізації наноматеріалів у розчинах використовують органічні та неорганічні сполуки, що забезпечують отримання колоїдних розчинів різного ступеня стійкості (політіоціангідрокінон, низькомолекулярний полівінілпіролідон, сироватковий альбумін людини, полісахариди, натрію цитрат та ін.) [9]. Токсичність композиції визначається не тільки токсичністю діючої речовини (наприклад, наночастинок металу), а також стабілізуючих або інших допоміжних компо-

нентів, що можуть вплинути на біологічну активність отриманого розчину, а також зумовити підвищення його токсичності. Зокрема, відомий спосіб стабілізації наночастинок  $\text{Ag}$  натрію цитратом, недоліком якого є широкий розподіл одержуваних наночастинок за розмірами, низька стабільність при зберіганні, а також забруднення кінцевого золю продуктами окиснення цитрат-аніона, зокрема, ацетондикарбоною та ітаконовою кислотами [10]. Також відомий спосіб стабілізації нанокристалічного діоксиду церію лимонною та поліакриловою кислотою, які додаються безпосередньо під час синтезу та адсорбуються на поверхні наночастинок діоксиду церію й перешкоджають їхній агломерації в процесі синтезу [11]. Недоліком зазначеного способу є його складність і трудомісткість. Своєю чергою, виявлено можливість використання як стабілізатор наночастинок полігідроксильних сполук (першою чергою, вуглеводів) [12]. Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза (4 г), натрію цитрат (1 г) у 100 мл дистильованої води) застосовують в експрес-методі визначення токсичності наноматеріалів у розчинах *in vitro* з використанням сперматозоїдів великої рогатої худоби як тест-об'єкта для розморожування сперми, а також як контрольний розчин. Отже, за умов використання як тест-об'єкт сперматозоїдів великої рогатої худоби, стабілізація нанопорошків металів глюкозо-цитратним буфером (співвідношення глюкози та натрію цитрату 4:1) є оптимальним рішенням, оскільки дозволяє отримувати стабільні гідрозолі (табл. 1).

З іншого боку, для досліджень антибактеріальної активності та фітотоксичності сперматозоїди великої рогатої худоби не можуть бути використані як тест-об'єкт. Також, вочевидь, недоцільним буде й застосування як стабілізатора глюкозо-цитратного буферу, який є сприятливим середовищем саме для

Таблиця 1

Дисперсність нанокомпозиту діоксиду титану + срібла (4 %) у глюкозо-цитратному буфері протягом часу

№ з/п	Середовище/стабілізатор	Доба	Аеродинамічний діаметр, нм
1	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:1)	I	48,65
2	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:1)	II	53,37
3	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:1)	III	52,12
4	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:4)	I	134,93
5	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:4)	II	195,04
6	Глюкозо-цитратний буфер (глюкоза : натрію цитрат: 4:4)	III	234,49

Таблиця 2

## Дисперсність титановмісних наноматеріалів у різних середовищах

№ з/п	Наноматеріал	Середовище/стабілізатор	Аеродинамічний діаметр, нм
1	TiO <sub>2</sub>	Глюкозо-цитратний буфер	46,84
2	TiO <sub>2</sub>	Фізіологічний розчин	Розмір частинок виміряти неможливо через швидку агломерацію
3	TiO <sub>2</sub>	FicollPaque Premium (полісахароза з діатриазотом натрію)	128,86
4	TiO <sub>2</sub> + Ag (4 %)	Глюкозо-цитратний буфер	48,8
5	TiO <sub>2</sub> + Ag (4 %)	Фізіологічний розчин	48,32
6	TiO <sub>2</sub> + Ag (4 %)	FicollPaque Premium (полісахароза з діатриазотом натрію)	328,8
7	TiO <sub>2</sub> + Ag (8 %)	Глюкозо-цитратний буфер	80,8
8	TiO <sub>2</sub> + Ag (8 %)	Фізіологічний розчин	98,08
9	TiO <sub>2</sub> + Ag (8 %)	FicollPaque Premium (полісахароза)	314,25

сперматозоїдів, але не є таким для мікроорганізмів і рослин.

Дослідження дисперсності титановмісних наноматеріалів показали, що в фізіологічному розчині частинки нанокомпозиту TiO<sub>2</sub> + Ag (4 %) у концентрації 3 мг/мл мають діаметр, співставний з таким у глюкозо-цитратному буфері (зі співвідношенням глюкози та натрію цитрату 4:1) (табл. 2). Проте отримані гідрозолі є нестабільними, оскільки суттєво агломерують вже на другу добу з середнім діаметром частинок близько декількох тисяч нанометрів. Таким чином, отримані гідрозолі необхідно використовувати в експериментальних дослідженнях *in vivo* та *in vitro* безпосередньо після приготування. Також використання як середовище для нанопорошків FicollPaque Premium – стерильного розчину полісахарози 400 з діатриазотом натрію зі щільністю 1,077 г/мл для біомедичних досліджень *in vitro* – продемонструвало швидку агломерацію наночастинок (табл. 2).

Враховуючи наведене, необхідні поглиблені дослідження впливу додаткової допованості нанопорошків важкими металами на організм працюючих у сфері нанотехнологій та об'єкти довкілля. Також представляється доцільним використання

мікроорганізмів (зокрема, санітарно-показових) як тест-об'єкт у скринінгових дослідженнях титановмісних наноматеріалів.

## Висновки

1. Стабілізація титановмісних нанопорошків глюкозо-цитратним буфером дозволяє отримувати відносно стабільні гідрозолі, що можуть бути використані в скринінгових дослідженнях зі застосуванням як тест-об'єкт сперматозоїдів великої рогатої худоби.
2. Для досліджень фіто- та антибактеріальної токсичності наноматеріалів доцільним є використання нанопорошків у фізіологічному розчині, який може бути застосований протягом першої доби. Використання стерильного розчину полісахарози з діатриазотом натрію як стабілізатора порошкових титановмісних наноматеріалів є недоцільним через швидку агломерацію наночастинок.
3. Необхідні поглиблені дослідження потенційного токсичного впливу додаткової допованості нанопорошків важкими металами на організм працюючих у сфері нанотехнологій та об'єкти довкілля.

## Література

1. Doped Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Potential Use in Nanomedicine. M. Carofiglio, S. Barui, V. Cauda, M. Laurenti. *Appl Sci (Basel)*. 2020. № 10 (15). P. 5194. <https://doi.org/10.3390/app10155194>.
2. Rare earth doped metal oxide nanoparticles for photocatalysis: a perspective. A. Mehtab, J. Ahmed, S. M. Alshehri et al. *Nanotechnology*. 2022. Jan 12. № 33 (14). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac43e7>.
3. Díez-Pascual A. M. Antibacterial Activity of Nanomaterials. *Nanomaterials (Basel)*. 2018. № 8 (6). P. 359. <https://doi.org/10.3390/nano8060359>.
4. Spread of multi drug resistant Escherichia coli harboring integrin via swine farm waste water treatment plant. J. H. Park, Y. J. Kim, K. Binn, K. H. Seo *Ecotoxicol Environ Saf.* 2018. № 149. P. 6–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.071>.
5. Nano titanium dioxide photocatalytic protein tyrosine nitration: a potential hazard of TiO<sub>2</sub> on skin. N. Lu, Z. Zhu, X. Zhao et al. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2008. № 370 (4). P. 675–680.
6. Скринінгова оцінка пошкоджуючої дії наноматеріалів з використанням сперматозоїдів великої рогатої худоби як тест-об'єкта. О. В. Демещка, М. М. Діденко, В. О. Мовчан та ін. *Південно-український медичний науковий журнал*. 2021. № 1. С. 12–18.
7. Дослідження функціональної активності мононуклеарних клітин крові за продукцією цитокінів під впливом фотоактивних титановмісних наноматеріалів *in vitro*. В. М. Рябовол, А. І. Курченко, О. П. Яворовський та ін. *Імунологія та алергологія: наука і практика*. 2021. № 3. С. 23–30.
8. Evaluation of the Comparative Acute Toxic Effects of TiO<sub>2</sub>, Ag-TiO<sub>2</sub> and ZnO-TiO<sub>2</sub> Composite Nanoparticles on Honey Bee (*Apis mellifera*). Y. Özkan, İ. İrende, G. Akdeniz et al. *Journal of International Environmental Application & Science*. 2015. № 1 (10). P. 26–36.
9. Phan H. T., Haes A. J. What Does Nanoparticle Stability Mean? *J. Phys. Chem. C Nanomater Interfaces*. 2019. № 123 (27). P. 16495–16507. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b00913>.
10. Synthesis of Citrate-Stabilized Silver Nanoparticles Modified by Thermal and pHp reconditioned Tannic Acid. R. La Spina, D. Mehn, F. Fumagalli et al. *Nanomaterials (Basel)*. 2020. № 10 (10). P. 2031. <https://doi.org/10.3390/nano10102031>.
11. Colloidal stability and catalytic activity of cerium oxide nanoparticles in cell culture media. X. Ju, A. Fučíková, B. Šmíd et al. *RSC Adv.* 2020. № 10 (65). P. 39373–39384. <https://doi.org/10.1039/d0ra08063b>.
12. Левченко О. Г., Лук'яненко А. О., Демещка О. В. Вплив складу зв'язуючого покриття електродів на токсичність зварювальних аерозолів. *Автоматичне зварювання*. 2019. № 7. С. 33–37.

**Демещка А. В., Белюга А. Г., Мовчан В. А., Патыка Т. И., Цапко В. Г.**

## **СТАБИЛИЗАЦИЯ ДОПИРОВАННЫХ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ СКРИНИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ РАБОТАЮЩИХ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Государственное учреждение «Институт медицины труда имени Ю. И. Кундиева Национальной академии медицинских наук Украины», г. Киев

*Введение.* Допирование тяжелыми металлами может повышать исходную токсичность наноматериала, следовательно – негативно влиять на здоровье работающих и вызывать загрязнение объектов окружающей среды.

*Цель исследования* – проанализировать дисперсность гидрозолей нанопорошков допированных титансодержащих наноматериалов в различных средах и обосновать целесообразность определенных стабилизаторов для серии скрининговых исследований потенциальной опасности.

*Материалы и методы исследования.* Оценены размерность комплекса диоксида титана (TiO<sub>2</sub>), допированного серебром (Ag) (наноккомпозит TiO<sub>2</sub> + Ag, массовая доля Ag ~ 4 %), комплекса TiO<sub>2</sub>, допированного Ag (наноккомпозит TiO<sub>2</sub> + Ag, массовая доля Ag ~ 8 %) и нанопорошка TiO<sub>2</sub> в разных средах/стабилизаторах. Размер частиц определяли методом динамического рассеяния света с помощью прибора «Analysette 12 DynaSizer» («Fritsch», Германия).

*Результаты.* Стабилизация титансодержащих нанопорошков глюкозоцитратным буфером позволяет получать относительно стабильные гидрозоли, которые могут быть использованы в скрининговых исследованиях с применением в качестве тест-объекта сперматозоидов крупного рогатого скота. Для исследований фито- и антибактериальной токсичности целесообразно применение нанопорошков в физиологическом растворе.

*Выводы.* Необходимы углубленные исследования влияния допирования нанопорошков тяжелыми металлами на организм людей, работающих в сфере нанотехнологий, и объекты окружающей среды.

**Ключевые слова:** титансодержащие наноматериалы, допирование, стабилизация, скрининг, дисперсность

Demetska O. V., Beliuha O. G., Movchan V. O., Patyka T. I., Tsapko V. G.

## STABILIZATION OF DOPED TITANIUM-CONTAINING NANOMATERIALS IN THE FRAMEWORK OF SCREENING STUDIES OF POTENTIAL HAZARD FOR WORKERS AND ENVIRONMENT

State Institution «Kundliev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv

*Introduction.* Doping with heavy metals can increase the initial toxicity of the nanomaterial, and cause adverse effects on environment and workers health.

*The purpose of research* – to analyze the dispersion of hydrosols of nanopowders of doped titanium-containing nanomaterials in different environments and to substantiate the feasibility of stabilizers for a series of screening studies of potential hazards.

*Materials and methods of research.* The dimensionality of titanium dioxide complex doped with silver ( $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$  nanocomposite, mass fraction of Ag ~ 4 %), titanium dioxide complex doped with silver ( $\text{TiO}_2 + \text{Ag}$  nanocomposite, mass fraction of Ag ~ 8 %), and titanium dioxide nanopowder ( $\text{TiO}_2$ ) in different environments/stabilizers was estimated. The particle size was determined by dynamic light scattering using an Analysette 12 DynaSizer (Fritsch, Germany).

*Results.* Stabilization of titanium nanopowders with a glucose-citrate buffer makes it possible to obtain relatively stable hydrosols that can be used in screening studies using bovine spermatozoa as a test object. For studies of phyto- and antibacterial toxicity, it is advisable to use nanopowders in physiological solution.

*Conclusions.* In-depth investigations on the potentially toxic effects of additional doping of nanopowders with heavy metals on workers health and environment are needed.

**Key words:** titanium-containing nanomaterials, doping, stabilization, screening, dispersion

## References

1. Carofiglio, M., Barui, S., Cauda, V., Laurenti, M. (2020), «Doped Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Potential Use in Nanomedicine», *Appl. Sci. (Basel)*, No. 10 (15), pp. 5194. <https://doi.org/10.3390/app10155194>.
2. Mehtab, A., Ahmed, J., Alshehri, S. M. et al. (2022), «Rare earth doped metal oxide nanoparticles for photocatalysis: a perspective», *Nanotechnology*, Jan 12, No. 33 (14). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac43e7>.
3. Díez-Pascual, A. M. (2018), «Antibacterial Activity of Nanomaterials», *Nanomaterials (Basel)*, No. 8 (6), pp. 359. <https://doi.org/10.3390/nano8060359>.
4. Park, J. H., Kim, Y. J., Binn, K., Seo, K. H. (2018), «Spread of multi drug resistant *Escherichia coli* harboring integrin via swine farm waste water treatment plant», *Ecotoxicol Environ Saf.*, No. 149, pp. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.071>.
5. Lu, N., Zhu, Z., Zhao, X. et al. (2008), «Nano titanium dioxide photocatalytic protein tyrosine nitration: a potential hazard of  $\text{TiO}_2$  on skin», *Biochem. Biophys. Res. Commun.* No. 370 (4), pp. 675–680.
6. Demetska, O. V., Didenko, M. M., Movchan, V. O. et al. (2021), «Screening assessment of the damaging effect of nanomaterials using bull sperm as a test object», *South Ukrainian medical scientific journal*, No. 1, pp. 12–18.
7. Riabovol, V., Kurchenko, A., Yavorovskyi, A. et al. (2021), «A study of the influence of photoactive titanium composite nanoparticles of the functional activity of cytokine-producing mononuclear blood cells *in vitro*», *Immunology and allergology: science and practice*, No. 3, pp. 23–30.
8. Özkan, Y., İrende, İ., Akdeniz, G. et al. (2015), «Evaluation of the Comparative Acute Toxic Effects of  $\text{TiO}_2$ , Ag- $\text{TiO}_2$  and ZnO- $\text{TiO}_2$  Composite Nanoparticles on Honey Bee (*Apis mellifera*)», *Journal of International Environmental Application & Science*, No. 1 (10), pp. 26–36.
9. Phan, H. T., Haes, A. J. (2019), «What Does Nanoparticle Stability Mean?», *J. Phys. Chem. C Nanomater Interfaces*, Jul 11, No. 123 (27), pp. 16495–16507. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b00913>.
10. La Spina, R., Mehn, D., Fumagalli, F. et al. (2020), «Synthesis of Citrate-Stabilized Silver Nanoparticles Modified by Thermal and pH reconditioned Tannic Acid», *Nanomaterials (Basel)*, Oct 15, No. 10 (10), pp. 2031. <https://doi.org/10.3390/nano10102031>.
11. Ju, X., Fučíková, A., Šmíd, B. et al. (2020), «Colloidal stability and catalytic activity of cerium oxide nanoparticles in cell culture media», *RSC Adv*, Oct 27, No. 10 (65), pp. 39373–39384. <https://doi.org/10.1039/d0ra08063b>.
12. Levchenko, O. G., Lukyanenko, A. O., Demetska, O. V. (2019), «The influence of the composition of the binding coating of electrodes on the toxicity of welding aerosols», *Automatic welding*, No. 7, pp. 33–37.

**ORCID ID співавторів та їхній внесок у підготовку та написання статті:**

*Демецька О. В.* (ORCID ID 0000-0002-8174-7813) – визначення розміру досліджуваних наноматеріалів методом динамічного розсіювання світла; аналіз результатів дослідження, висновки;

*Белюга О. Г.* (ORCID ID 0000-0001-9445-9469) – підготовка зразків наноматеріалів до дослідження, аналіз результатів дослідження;

*Мовчан В. О.* (ORCID ID 0000-0002-6712-7976) – систематизація результативних даних з вивчення особливостей пошкоджувальної дії досліджуваних матеріалів, підготовка статті до друку;

*Патика Т. І.* (ORCID ID 0000-0003-1316-0516) – аналіз результатів дослідження, висновки;

*Цапко В. Г.* (ORCID ID 0000-0001-8176-152X) – аналіз сучасних даних з комплексної оцінки небезпеки наноматеріалів, аналіз результатів дослідження.

*Інформація щодо джерел фінансування дослідження:* дослідження виконано за темою «Розробка предикторів потенційної небезпеки промислових аерозолів різної дисперсності», № державної реєстрації 0122U000674.

*Надійшла:* 17 серпня 2022 р.

*Прийнята до друку:* 15 вересня 2022 р.

**Контактна особа:** Демецька Олександра Віталіївна, провідний науковий співробітник, лабораторія медико-біологічних критеріїв професійних впливів та гігієни праці у зварювальному виробництві, ДУ «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва Національної академії медичних наук України», буд. 75, вул. Саксаганського, м. Київ, 01033. Тел.: + 38 0 50 637 81 08. Електронна пошта: dalexandra@ukr.net