

Ультрадисперсні зважені частинки промислового аерозолі як фактор неканцерогенного ризику для працівників машинобудівного підприємства

Л. П. Шаравара^{ID}

Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна

Ключові слова:

наночастинки, ультрадисперсні зважені частинки, машинобудівне підприємство, неканцерогенний ризик.

Запорізький
медичний журнал.
2025. Т. 27, № 4(151).
С. 296-304

Мета роботи – оцінити неканцерогенний ризик від впливу зважених ультрадисперсних частинок промислового аерозолі у працівників машинобудівного підприємства.

Матеріали і методи. Вміст зважених ультрадисперсних частинок дослідили за допомогою сканувального спектрометра NanoScan 3910. Їхній хімічний склад вивчили методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою. Для оцінювання неканцерогенного ризику обрахували коефіцієнти небезпеки, а також визначили рівень ризику залежно від розміру зважених частинок за допомогою запропонованої нової методики.

Результати. У результаті дослідження встановлено, що до складу зважених частинок входили хімічні елементи з різною щільністю. Відповідно до цього здійснили обрахунок і ранжування коефіцієнтів небезпеки (HQ) серед працівників машинобудівного підприємства. Так, коефіцієнти небезпеки (HQ) від впливу зважених ультрадисперсних частинок зі щільністю $\geq 6 \text{ кг/м}^3$: 4,88 – плавильник металу та сплавів, 4,44 – електрозварник ручного зварювання, 2,63 – обрубувач, 2,16 – шліфувальник. Коефіцієнти небезпеки (HQ) від впливу зважених ультрадисперсних частинок зі щільністю $\leq 6 \text{ кг/м}^3$: 2,44 – плавильник металу та сплавів, 2,22 – електрозварник ручного зварювання, 1,32 – обрубувач, 1,08 – шліфувальник. За обрахунком неканцерогенного ризику залежно від розміру частинок, відповідно до запропонованої методики, для плавильника металу та сплавів найбільший ризик становлять частинки розміром 11 нм і 15 нм. Для електрозварників ручного зварювання критичними є частинки розміром 11 нм, а також більші частинки – у діапазоні 64–154 нм. Шліфувальники зазнають найбільшого ризику від впливу частинок розміром 15–48 нм, а для обрубувачів найбільш небезпечними є частинки розміром 48 нм і більше – в діапазоні 154–205 нм.

Висновки. Обраховані коефіцієнти небезпеки (HQ) від впливу зважених ультрадисперсних частинок перевищували одиницю для всіх робочих місць, що не можна вважати допустимим, оскільки є висока імовірність виникнення шкідливих ефектів. Відповідно до запропонованої методики оцінки неканцерогенного ризику, визначено рівні ризику для кожного робочого місця залежно від розміру частинок; це сприятиме впровадженню необхідних заходів профілактики.

Keywords:

nanoparticles, suspended ultrafine particles, machine-building enterprise, non-carcinogenic hazard.

Zaporozhye
Medical Journal.
2025;27(4):296-304

Suspended ultrafine particles of industrial aerosol as a non-carcinogenic hazard factor for workers of a machine-building enterprise

L. P. Sharavara

Aim. To evaluate the non-carcinogenic hazard posed by exposure to suspended ultrafine industrial aerosol particles among workers of a machine-building enterprise.

Materials and methods. The content of suspended ultrafine particles was analyzed using a scanning spectrometer NanoScan 3910. The chemical composition was assessed by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma. To assess adverse non-carcinogenic effects, hazard quotients (HQs) were calculated, and the risk level was determined depending on the suspended particle using the proposed new methodology.

Results. The study has revealed that suspended particles comprised chemical elements with varying densities. Based on this, HQs were calculated and ranked for workers at the machine-building enterprise. HQs from the impact of suspended ultrafine particles with a density $\geq 6 \text{ kg/m}^3$: 4.88 – for furnace operators, 4.44 – for welders, 2.63 – for cutters, 2.16 – for grinders. HQs from the impact of suspended ultrafine particles with a density $\leq 6 \text{ kg/m}^3$: 2.44 – for furnace operators, 2.22 – for welders, 1.32 – for cutters, 1.08 – for grinders.

According to the proposed methodology, for furnace operators, particles of 11 nm and 15 nm posed the greatest hazard. For manual electric welders, 11 nm particles were critical, as well as larger particles in the range 64–154 nm. Grinders faced the highest risk from exposure to particles of 15–48 nm, while for cutters, the most dangerous were particles of 48 nm and larger ones in the range 154–205 nm.

Conclusions. The calculated hazard quotients for suspended ultrafine particles exceeded safe limits at all workplaces, which is not within acceptable parameters given the high probability of harmful effects. According to the proposed methodology, hazard levels were determined for each workplace based on particle size to guide the implementation of targeted preventive measures.

Наявність у повітрі робочої зони працівників різних галузей промисловості зважених ультрадисперсних частинок (УДЧ) доведено у результаті досліджень, що здійснили закордонні та вітчизняні науковці. Встановлено, що УДЧ, які утворюються випадково, потрапляють у повітря робочої зони працівників безпосередньо під час різних технологічних процесів (горіння, плавлення, випаровування, зварювання, механічна обробка тощо) [1,2,3,4,5].

На жаль, утворення цих наночастинок є неконтрольованим процесом, у результаті якого у повітря робочої зони потрапляють зважені частинки (ЗЧ), різні за розміром, формою, об'ємом, площею поверхні та хімічним складом, що може становити суттєву загрозу для здоров'я працівників.

На відміну від працівників, які зазнають впливу випадково утворених УДЧ, працівники, котрі працюють зі штучними наноматеріалами та використовують у роботі наночастинки з відомими фізико-хімічними властивостями, перебувають у безпечніших умовах, оскільки мають інформацію про можливі ризики та вживають необхідних заходів профілактики під час роботи з наноматеріалами.

Численні дослідження, здійснені *in vitro* та *in vivo*, дали змогу зробити висновок, що токсична дія наночастинок залежить саме від їхніх фізико-хімічних властивостей: хімічного складу, розміру, форми, характеристик поверхні, заряду, кристалічної структури, розчинності та ступеня агломерації [6,7,8,9]. Тому дослідження фізико-хімічних властивостей УДЧ, що утворюються під час різних технологічних процесів, а також оцінювання ризику для здоров'я працівників, які зазнають їх впливу, залишаються актуальними у галузі профілактичної медицини.

Мета роботи

Оцінити неканцерогенний ризик від впливу зважених ультрадисперсних частинок промислового аерозолі у працівників машинобудівного підприємства.

Матеріали і методи дослідження

Для обрахунку неканцерогенних ризиків від впливу УДЧ дослідили їхню кількісну (частинки/см³) та масову концентрацію (мкг/см³) на робочих місцях працівників, використавши портативний сканувальний спектрометр NanoScan 3910 (США). Встановили показники на робочих місцях плавильника металу та сплавів ($n = 416$), електрозварника ручного зварювання ($n = 315$), шліфувальника ($n = 78$), обрубувача ($n = 286$), а також на робочих місцях, де не було джерел утворення зважених УДЧ, що дало змогу сформувати контрольну групу ($n = 315$). Ці показники вимірювали для різних за розміром ЗЧ у діапазоні від 10 нм до 400 нм.

Дані щодо кількісної та масової концентрації ЗЧ опрацювали, використавши програму Statistica, версія 13 (Copyright 1984–2018 TIBCO Software Inc. All rights reserved. Ліцензія № JPZ8041382130ARCN10-J). Для оцінювання нормальності розподілу застосували тест Шапіро–Вілка. Оскільки розподіл відрізнявся від нормального, описову статистику результатів наведено як медіану та міжквартильний розмах – Ме (Q25; Q75). Достовірність відмінностей порівнюваних величин

кількісної та масової концентрації ЗЧ на робочих місцях працівників і працівників контрольної групи визначено за критерієм Манна–Вітні. Статистично значущою вважали різницю при $p \leq 0,05$.

Хімічний склад ЗЧ у взятих пробах повітря на робочих місцях працівників проаналізовано методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП), для цього застосували спектрометр «Optima 2100 DV» («PerkinElmer», США).

Коефіцієнти небезпеки (НҚ) для УДЧ обрахували за методикою, що наведена в методичних рекомендаціях «Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами» (затверджено Наказом МОЗ України від 02 березня 2024 року № 358) [10]. Коефіцієнти небезпеки обрахували шляхом порівняння виміряних показників чисельної концентрації (частинки/см³) з орієнтовно безпечними рівнями наночастинок, що визначили фахівці Інституту професійної безпеки та здоров'я Німеччини та США (IFA, NIOSH). Так, орієнтовно безпечні рівні для наночастинок металів, оксидів металів та інших наноматеріалів зі щільністю елементів $\geq 6 \text{ кг/м}^3$ – не більше ніж 20 000 частинок/см³, для наноматеріалів зі щільністю елементів $\leq 6 \text{ кг/м}^3$ – не більше ніж 40 000 частинок/см³ [11,12].

Обраховані коефіцієнти небезпеки (НҚ) оцінювали за критеріями неканцерогенного ризику: НҚ < 1 – ризик виникнення шкідливих ефектів вкрай малий, НҚ = 1 – гранична величина, за якої термінові заходи не доцільні, але вона не є абсолютно прийнятною, НҚ > 1 – імовірність розвитку шкідливих ефектів, що пропорційно зростає зі збільшенням коефіцієнта.

Окремо визначили й оцінили неканцерогенний ризик для УДЧ комбінованого хімічного складу залежно від їхнього розміру за новою методикою. У нашій методиці запропоновано модифікувати формулу для обрахунку надлишкового канцерогенного ризику за життя, що наведена у праці Michal Macko et al. [13], як формулу для обрахунку життєвого неканцерогенного ризику. Для визначення надлишкового життєвого канцерогенного ризику автори рекомендують застосовувати коефіцієнти токсичності та розмірності ЗЧ для однієї хімічної речовини (канцероген). Ми модифікували формулу для оцінювання неканцерогенних ризиків впливу різних за розміром ЗЧ комбінованого хімічного складу, а не окремої речовини, беручи до уваги коефіцієнти токсичності та розмірності ЗЧ, а також коефіцієнт небезпеки (НҚ) від дії УДЧ.

Ця авторська методика оцінювання неканцерогенного ризику для УДЧ передбачає передусім обрахунок надлишкового життєвого неканцерогенного ризику за формулою:

$$ELNCR_i = LADD_i \times HQ_i \times K_t \times K_p, \quad (1)$$

де ELNCR_i (Excess lifetime non-cancer risk) – надлишковий життєвий неканцерогенний ризик для частинок різних розмірів, мкг/(кг×день); LADD_i – середня добова доза надходження ЗЧ різних розмірів, мкг/(кг×день); НҚ_i – коефіцієнт небезпеки, обчислений для різних за розміром ЗЧ; К_t – коефіцієнт токсичності залежно від розміру ЗЧ (К_t для ЗЧ розміром 1–20 нм – 10, К_t для ЗЧ розміром 20–40 нм – 7, К_t для ЗЧ розміром 40–60 нм – 4, К_t для ЗЧ розміром 60–100 нм – 1) [13]; К_p – коефіцієнт

розмірності частинок залежно від розміру ЗЧ обраховано за формулою: $K_p = (100 \text{ нм})^3 / \text{розмір ЗЧ}$.

Середню добову дозу (LADD) надходження різних за розмірами ЗЧ визначили за методичними рекомендаціями «Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами» (затверджено Наказом МОЗ України від 02.03.2024 року № 358) за формулою:

$$\text{LADD} = [C \times CR \times ED \times EF] / [BW \times AT \times 365], \quad (2)$$

де LADD – середня добова доза, мкг/(кг×день); C – концентрація речовини в забрудненому повітряному середовищі, мкг/м³; CR – швидкість надходження повітря до організму, м³/день, що залежить від категорії праці робітника (для категорії Ia та Ib – 4 м³, IIa та IIb – 7 м³, IIIa та IIIb – 10 м³); ED – тривалість впливу, роки, 35 років; EF – частота впливу, днів/рік, 251 робочих днів; BW – маса тіла людини, кг, 70 кг; AT – період осереднення експозиції (для неканцерогенів – 30 років); 365 – кількість днів у році.

Наступний етап методики оцінювання неканцерогенного ризику передбачав визначення частки (Fraction, F) кожного розміру ЗЧ у складі загальної масової концентрації ЗЧ промислового аерозолі. Обчислення здійснили за формулою:

$$F_i = C_i / C_{\text{total}} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (4)$$

Надалі визначено неканцерогенний ризик (R_i), що враховує надлишковий життєвий неканцерогенний ризик для частинок різного розміру (ELNCR_i) та частку (F_i) різних за розмірами ЗЧ у складі загальної масової концентрації. Використали формулу:

$$R_i = \text{ELNCR}_i \times F_i \quad (5)$$

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) обчислюють за формулою (6) шляхом додавання всіх отриманих R_i для різних за розмірами ЗЧ, що виявлені в складі промислового аерозолі:

$$R_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (6)$$

Останній етап, передбачений методикою, – обрахунок відносного ризику (RR), який можна визначити й окремо для різних за розмірами ЗЧ, і для всіх ЗЧ промислового аерозолі разом. Оскільки досі в Україні та світі не встановлено гранично допустиму концентрацію для УДЧ, пропонуємо оцінювати відносний ризик (RR), який показує кратність перевищення неканцерогенного ризику (R_i) на робочому місці працівника порівняно з неканцерогенним ризиком ($R_{\text{контроль}}$) контрольної групи, де немає джерел утворення УДЧ, за формулою:

$$\text{RR}_i = R_{i \text{ на робочому місці}} / R_{i \text{ контроль}} \quad (7)$$

Використовуючи формулу (8), обраховують загальний відносний ризик (RR_{total}), що показує кратність перевищення всіх наявних УДЧ у промисловому аерозолі робочої зони працівників груп дослідження та контролю.

$$\text{RR}_{\text{total}} = R_{\text{total на робочому місці}} / R_{\text{total контроль}} \quad (8)$$

Отже, оцінювання неканцерогенного ризику від дії УДЧ залежно від їхнього розміру можна здійснити за алгоритмом, що наведено як блок-схему (рис. 1).

Результати

У результаті дослідження встановлено, що повітря робочої зони працівників машинобудівного підприємства містить УДЧ у різних чисельних концентраціях. Найвищу загальну чисельну концентрацію зважених УДЧ зафіксовано на робочих місцях працівників, які зазнавали впливу аерозолі конденсації (високотермічні процеси зварювання та плавлення металів): на робочому місці електрозварника ручного зварювання – 88804,54 (58448,1; 151032,2) частинок/см³, плавильника металу та сплавів – 97669,92 (89746,33; 1100592,0) частинок/см³. Найнижчу загальну чисельну концентрацію ЗЧ на робочих місцях працівників, які зазнавали впливу аерозолі дезінтеграції (механічна обробка деталей): на робочому місці шліфувальника – 43246,76 (41690,05; 98154,38) частинок/см³, обрубувача – 52620,90 (31672,78; 61239,35) частинок/см³. Ці показники статистично вірогідно відрізнялися ($p \leq 0,05$) від даних контрольної групи (на робочих місцях не було джерел утворення промислового аерозолі).

У результаті оцінювання концентрацій частинок залежно від розмірів встановлено: на робочому місці плавильника металу та сплавів зафіксовано статистично вірогідну різницю ($p \leq 0,05$) за всіма вимірними розмірами УДЧ, електрозварника ручного зварювання та обрубувача – за УДЧ розміром 11–205 нм, шліфувальника – 11–115 нм.

Встановлено, що до складу УДЧ промислового аерозолі працівників входили ЗЧ комбінованого хімічного складу з різними за щільністю хімічними елементами: зі щільністю $<6 \text{ кг/м}^3$ – Al, Mn, Ti, Ca, Si, наночастинки зі щільністю $>6 \text{ кг/м}^3$ – Mg, Fe, Cr, Ni, Mo, Zn та W. Тому обчислили відповідні коефіцієнти небезпеки (рис. 2). Усі коефіцієнти небезпеки для УДЧ залежно від щільності складових хімічних елементів ($<6 \text{ кг/м}^3$ та $>6 \text{ кг/м}^3$) перевищували 1, що не можна вважати допустимим, – є імовірність виникнення шкідливих ефектів у працівників цих професій. Так, коефіцієнти небезпеки (HQ) для хімічних елементів, щільність яких $>6 \text{ кг/м}^3$, становили для плавильника металу та сплавів 4,9, для електрозварника ручного зварювання – 4,4, для обрубувача – 2,6, шліфувальника – 2,2. Коефіцієнти небезпеки (HQ) для хімічних елементів, щільність яких $<6 \text{ кг/м}^3$, становили для плавильника металу та сплавів 2,4, для електрозварника ручного зварювання – 2,2, для обрубувача – 1,3, шліфувальника – 1,1. У працівників контрольної групи коефіцієнти небезпеки для зважених УДЧ залежно від щільності складових елементів ($>6 \text{ кг/м}^3$ та $<6 \text{ кг/м}^3$) не перевищували 1, тому зробили висновок про вкрай низький ризик виникнення шкідливих ефектів ($\text{HQ} = 0,4$ та $\text{HQ} = 0,2$ відповідно).

Відповідно до запропонованої методики оцінювання неканцерогенних ризиків, враховуючи розміри ЗЧ та використовуючи модифіковану формулу, здійснили відповідні обрахунки щодо робочих місць працівників машинобудівного підприємства, в повітрі робочої зони

1

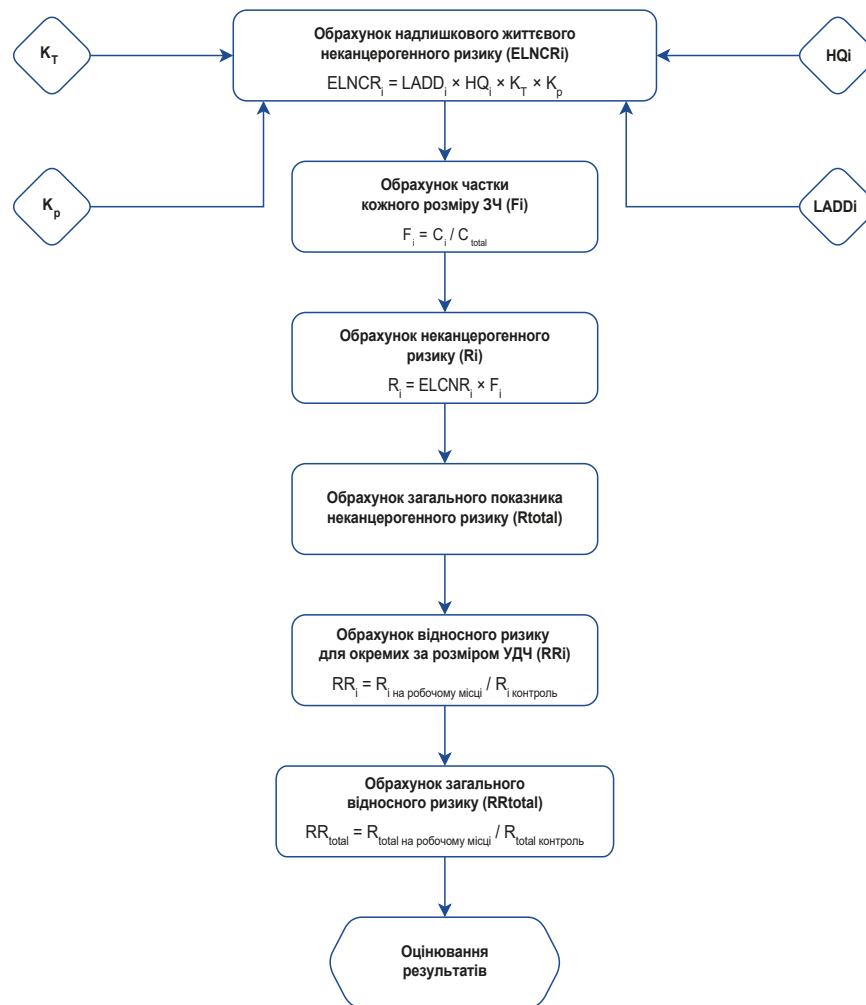


Рис. 1. Алгоритм оцінювання неканцерогенного ризику від дії УДЧ залежно від розміру.

2

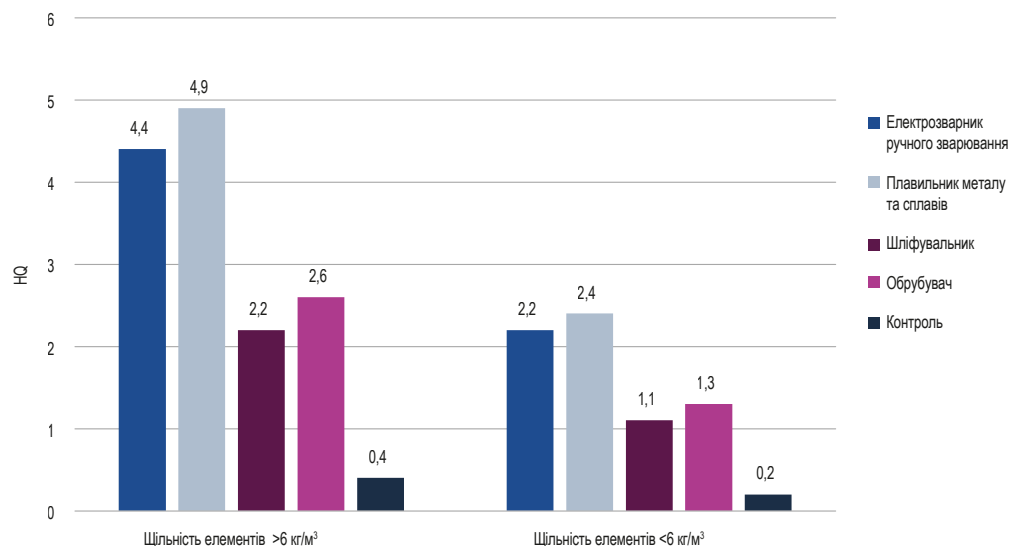
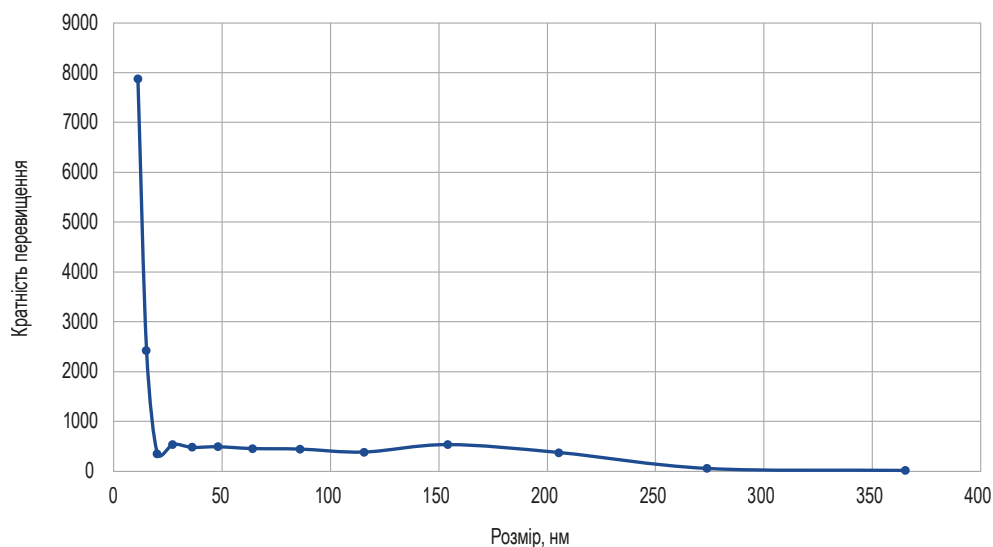


Рис. 2. Коефіцієнти небезпеки (HQ) впливу УДЧ на робочих місцях працівників машинобудівного підприємства залежно від щільності хімічних елементів у складі промислового аерозолі.

Таблиця 1. Показники неканцерогенного ризику, обчислені для робочого місця плавильника металу, залежно від розміру УДЧ

Розмір, нм	LADD, мкг/(кг×добу)		ELNCR, мкг/(кг×добу)		R, мкг/(кг×добу)		RR
	Плавка	Контроль	Плавка	Контроль	Плавка	Контроль	
11	0,000688	$9,17 \times 10^{-6}$	1,48	$7,15 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-8}$	7873,0
15	0,002522	$5,04 \times 10^{-5}$	3,54	$3,70 \times 10^{-3}$	$9,65 \times 10^{-4}$	$3,99 \times 10^{-7}$	2417,8
20	0,004355	0,000169	1,34	$5,01 \times 10^{-3}$	$6,31 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-6}$	347,2
27	0,016848	0,000564	3,36	$9,41 \times 10^{-3}$	$6,13 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-5}$	539,6
36	0,045386	0,001582	4,32	$1,31 \times 10^{-2}$	$2,12 \times 10^{-2}$	$4,43 \times 10^{-5}$	478,5
48	0,106474	0,003681	2,45	$7,33 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-2}$	$5,77 \times 10^{-5}$	489,2
64	0,216273	0,007642	$4,46 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-2}$	$2,30 \times 10^{-5}$	453,6
86	0,430941	0,015404	$3,12 \times 10^{-1}$	$9,96 \times 10^{-4}$	$1,45 \times 10^{-2}$	$3,28 \times 10^{-5}$	442,9
115	0,740278	0,029102	$1,60 \times 10^{-1}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-5}$	384,0
154	1,339354	0,058195	$9,31 \times 10^{-2}$	$2,99 \times 10^{-4}$	$1,35 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-5}$	533,0
205	2,00949	0,116340	$3,72 \times 10^{-2}$	$1,65 \times 10^{-4}$	$8,09 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-5}$	373,9
273	1,898087	0,232511	$5,85 \times 10^{-3}$	$9,87 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-3}$	$2,21 \times 10^{-5}$	54,3
365	2,434585	0,464457	$1,69 \times 10^{-3}$	$6,82 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$3,30 \times 10^{-5}$	14,8
Загалом	9,25	0,93	$8,86 \times 10^{-1}$	$7,42 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-1}$	$3,04 \times 10^{-3}$	389

3

**Рис. 3.** Відносний ризик (RR) або кратність перевищення УДЧ різних розмірів на робочому місці плавильника металу порівняно з контролем.

яких утворюється аерозоль конденсації (високотермічні процеси плавлення та зварювання металу – робочі місця плавильника металу та сплавів, електрозварника ручного зварювання) та аерозоль дезінтеграції (механічна обробка металу – робочі місця шліфувальника та обрубувача).

Результати, встановлені на робочому місці плавильника металу та сплавів, наведено в таблиці 1.

Встановлено, що найбільший відносний ризик (кратність перевищення показників порівняно з контролем, RR) на робочому місці плавильника металу та сплавів зареєстровано для найменших за розміром ЗЧ (11 нм та 15 нм) у 7873 та 2417 разів, які мають найвищий рівень відносного ризику серед усіх зважених УДЧ із різними розмірами, котрі містяться в промисловому аерозолі (рис. 3).

Щодо ЗЧ інших розмірів також зафіксовано значне перевищення порівняно з контролем – від 347,2 до 539,6 раза.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для промислового аерозолю ультрадисперсного діапазону на робочому місці плавильника металу та сплавів становив $1,18 \times 10^{-1}$ мкг/(кг×добу), для робочого місця працівників контролю – $3,04 \times 10^{-4}$ мкг/(кг×добу). Відносний ризик або кратність перевищення (RR_{total}) на робочому місці плавильника металу та сплавів порівняно з контролем – у 389 разів.

Використавши дані щодо масової концентрації УДЧ, обчислили показники неканцерогенного ризику для робочого місця електрозварника ручного зварювання (табл. 2).

Визначили, що найбільша кратність перевищення (RR) показників на робочому місці електрозварника ручного зварювання порівняно з контролем зафіксована для ЗЧ розміром 11 нм – у 148,3 раза, розміром ЗЧ від 64 нм до 154 нм – у 322,4–571,7 раза, що мали найвищий рівень відносного ризику з-поміж усіх УДЧ різних

Таблиця 2. Показники неканцерогенного ризику, обраховані для електрозварника ручного зварювання, залежно від розміру УДЧ

Розмір, мм	LADD, мкг/(кг×добу)		ELNCR, мкг/(кг×добу)		R, мкг/(кг×добу)		RR
	Зварювання	Контроль	Зварювання	Контроль	Зварювання	Контроль	
11	0,000112	$9,17 \times 10^{-6}$	$6,12 \times 10^{-2}$	$7,15 \times 10^{-4}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$1,40 \times 10^{-8}$	148,2
15	0,000497	$5,04 \times 10^{-5}$	$1,99 \times 10^{-1}$	$3,70 \times 10^{-3}$	$2,99 \times 10^{-5}$	$3,99 \times 10^{-7}$	75,0
20	0,001211	0,000169	$1,47 \times 10^{-1}$	$5,01 \times 10^{-3}$	$5,38 \times 10^{-5}$	$1,82 \times 10^{-6}$	29,6
27	0,004605	0,000564	$3,58 \times 10^{-1}$	$9,41 \times 10^{-3}$	$4,99 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-5}$	43,9
36	0,014818	0,001582	$6,57 \times 10^{-1}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$2,95 \times 10^{-3}$	$4,43 \times 10^{-5}$	66,5
48	0,044205	0,003681	$6,04 \times 10^{-1}$	$7,33 \times 10^{-3}$	$8,08 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-5}$	139,9
64	0,121233	0,007642	$2,02 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-3}$	$7,41 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-5}$	322,4
86	0,279812	0,015404	$1,88 \times 10^{-1}$	$9,96 \times 10^{-4}$	$1,59 \times 10^{-2}$	$3,28 \times 10^{-5}$	484,2
115	0,532788	0,029102	$1,19 \times 10^{-1}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$1,91 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-5}$	571,7
154	0,770103	0,058195	$4,40 \times 10^{-2}$	$2,99 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-5}$	404,5
205	0,822596	0,116340	$8,91 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-4}$	$2,22 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-5}$	102,4
273	0,273698	0,232511	$1,74 \times 10^{-4}$	$9,87 \times 10^{-5}$	$1,44 \times 10^{-5}$	$2,21 \times 10^{-5}$	0,65
365	0,442258	0,464457	$7,97 \times 10^{-5}$	$6,82 \times 10^{-5}$	$1,07 \times 10^{-5}$	$3,30 \times 10^{-5}$	0,35
Загалом	3,31	0,93	$1,85 \times 10^{-1}$	$7,42 \times 10^{-3}$	$6,65 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-3}$	218,7

Таблиця 3. Показники неканцерогенного ризику, обраховані для робочого місця шліфувальника, залежно від розміру УДЧ

Розмір, мм	LADD, мкг/(кг×добу)		ELNCR, мкг/(кг×добу)		R, мкг/(кг×добу)		RR
	Шліфування	Контроль	Шліфування	Контроль	Шліфування	Контроль	
11	$6,41 \times 10^{-5}$	$9,17 \times 10^{-6}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$7,15 \times 10^{-4}$	$5,96 \times 10^{-7}$	$1,40 \times 10^{-8}$	42,5
15	0,000730	$5,04 \times 10^{-5}$	$4,23 \times 10^{-1}$	$3,70 \times 10^{-3}$	$1,58 \times 10^{-4}$	$3,99 \times 10^{-7}$	395,1
20	0,003048	0,000169	$9,21 \times 10^{-1}$	$5,01 \times 10^{-3}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-6}$	788,7
27	0,009739	0,000564	1,60	$9,41 \times 10^{-3}$	$7,97 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-5}$	702,1
36	0,021324	0,001582	1,36	$1,31 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$4,43 \times 10^{-5}$	334,4
48	0,035902	0,003681	$3,99 \times 10^{-1}$	$7,33 \times 10^{-3}$	$7,30 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-5}$	126,4
64	0,05288	0,007642	$3,85 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-5}$	45,2
86	0,080549	0,015404	$1,56 \times 10^{-2}$	$9,96 \times 10^{-4}$	$6,39 \times 10^{-4}$	$3,28 \times 10^{-5}$	19,5
115	0,133283	0,029102	$7,43 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$5,05 \times 10^{-4}$	$3,34 \times 10^{-5}$	15,1
154	0,211521	0,058195	$3,32 \times 10^{-3}$	$2,99 \times 10^{-4}$	$3,58 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-5}$	14,1
205	0,313323	0,116340	$1,29 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-4}$	$2,07 \times 10^{-4}$	$2,16 \times 10^{-5}$	9,6
273	0,361356	0,232511	$3,03 \times 10^{-4}$	$9,87 \times 10^{-5}$	$5,58 \times 10^{-5}$	$2,21 \times 10^{-5}$	2,5
365	0,736343	0,464457	$2,21 \times 10^{-4}$	$6,82 \times 10^{-5}$	$8,30 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$	2,8
Загалом	1,96	0,93	$5,88 \times 10^{-4}$	$7,42 \times 10^{-3}$	$3,46 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-3}$	113,7

Таблиця 4. Показники неканцерогенного ризику, обраховані для робочого місця обрубувача, залежно від розміру УДЧ

Розмір, мм	LADD, мкг/(кг×добу)		ELNCR, мкг/(кг×добу)		R, мкг/(кг×добу)		RR
	Обрубка	Контроль	Обрубка	Контроль	Обрубка	Контроль	
11	$8,02 \times 10^{-5}$	$9,17 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-2}$	$7,15 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-6}$	$1,40 \times 10^{-8}$	75,6
15	0,000401	$5,04 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-1}$	$3,70 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-5}$	$3,99 \times 10^{-7}$	48,3
20	0,001042	0,000169	$1,11 \times 10^{-1}$	$5,01 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^{-5}$	$1,82 \times 10^{-6}$	26,0
27	0,004492	0,000564	$3,40 \times 10^{-1}$	$9,41 \times 10^{-3}$	$6,21 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-5}$	54,7
36	0,014922	0,001582	$6,67 \times 10^{-1}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$4,04 \times 10^{-3}$	$4,43 \times 10^{-5}$	91,3
48	0,038429	0,003681	$4,57 \times 10^{-1}$	$7,33 \times 10^{-3}$	$7,13 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-5}$	123,5
64	0,057684	0,007642	$4,58 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-3}$	$1,07 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-5}$	46,7
86	0,129889	0,015404	$4,05 \times 10^{-2}$	$9,96 \times 10^{-4}$	$2,14 \times 10^{-3}$	$3,28 \times 10^{-5}$	65,1
115	0,262827	0,029102	$2,89 \times 10^{-2}$	$5,77 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-3}$	$3,34 \times 10^{-5}$	92,3
154	0,534320	0,058195	$2,12 \times 10^{-2}$	$2,99 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-3}$	$2,53 \times 10^{-5}$	181,7
205	0,779979	0,116340	$8,01 \times 10^{-3}$	$1,65 \times 10^{-4}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-5}$	117,4
273	0,277028	0,232511	$1,78 \times 10^{-4}$	$9,87 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-5}$	$2,21 \times 10^{-5}$	0,91
365	0,358941	0,464457	$5,25 \times 10^{-5}$	$6,82 \times 10^{-5}$	$7,66 \times 10^{-6}$	$3,3 \times 10^{-5}$	0,26
Загалом	2,46	0,93	$9,63 \times 10^{-2}$	$7,42 \times 10^{-3}$	$2,53 \times 10^{-2}$	$3,04 \times 10^{-3}$	83,3

4

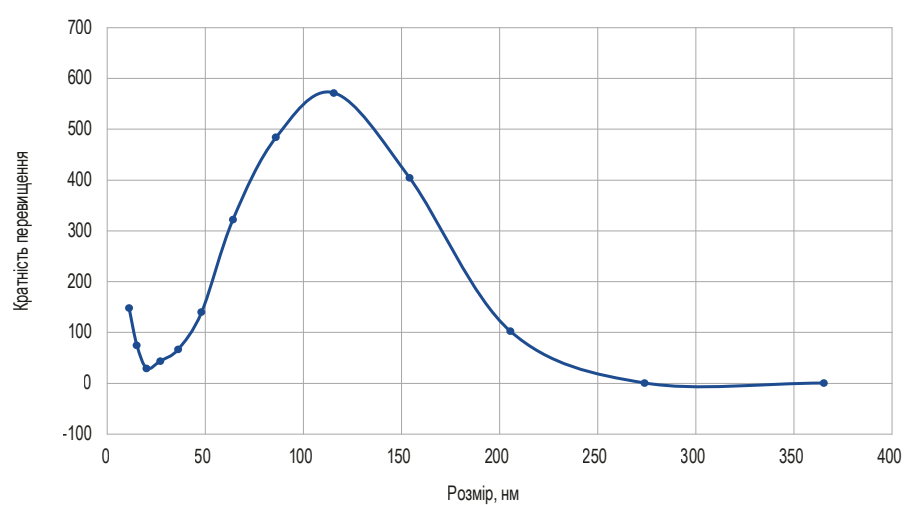


Рис. 4. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення вмісту УДЧ різних розмірів на робочому місці електрозварника ручного зварювання порівняно з контролем.

5

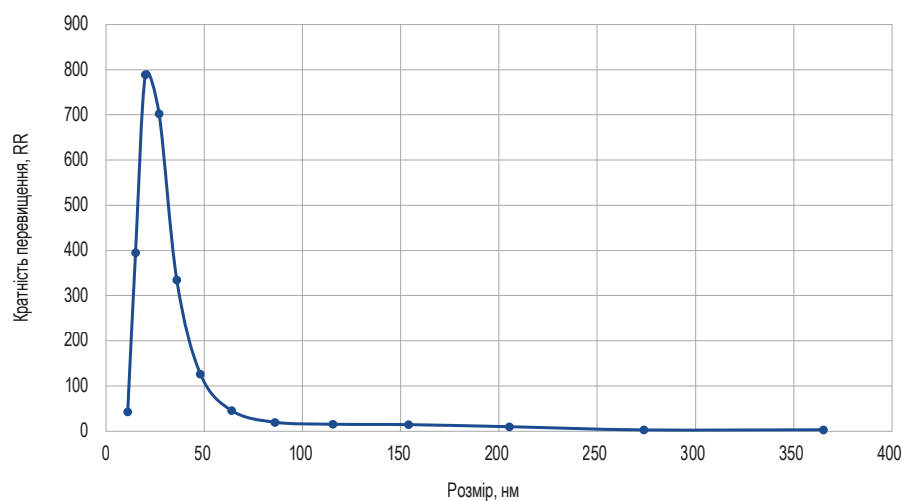


Рис. 5. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення УДЧ різного розміру на робочому місці шліфувальника порівняно з контролем.

6

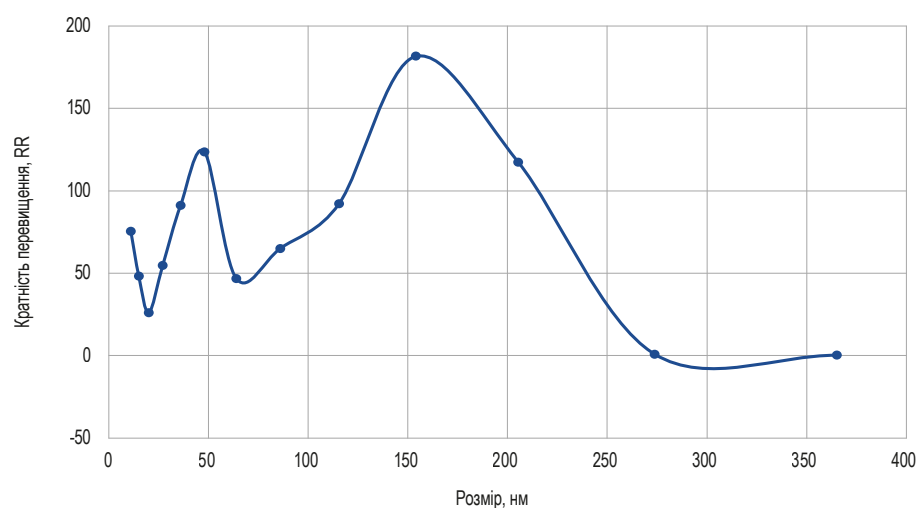


Рис. 6. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення УДЧ різних розмірів на робочому місці обробувача порівняно з контролем.

розмірів, котрі містилися в промисловому аерозолі. Для ЗЧ інших розмірів також встановлено перевищення у межах від 29,6 до 139,9 раза. Найменші ризики встановлено для зважених частинок більших розмірів – 273 нм та 365 нм. Встановлені показники відносного ризику наведено на *рис. 4*.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для УДЧ промислового аерозолі на робочому місці електрозварника ручного зварювання становив $6,7 \times 10^{-2}$ мкг/(кг·добу), що має загальну кратність перевищення RR_{total} у 218 разів порівняно з контролем.

У результаті обрахунку показників неканцерогенного ризику для шліфувальника встановлено, що найбільшу кратність перевищення відносного ризику за розміром ЗЧ порівняно з контролем зафіксовано для ЗЧ розміром 15–48 нм – у 126,4–788,7 раза, які мали найвищий рівень відносного ризику з-поміж усіх УДЧ різних розмірів, котрі містяться в промисловому аерозолі (*табл. 3*). Щодо ЗЧ інших розмірів зафіксовано перевищення у межах від 15,1 до 42,5 раза. Найменші ризики встановлено для зважених частинок великого розміру: 205 нм – у 9,5 раза, 273 нм – у 2,5 раза та 365 нм – у 2,8 раза. Показники відносного ризику наведено на *рис. 5*.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для УДЧ промислового аерозолі на робочому місці шліфувальника становив $3,46 \times 10^{-2}$ мкг/(кг·добу), що має загальну кратність перевищення RR_{total} у 113,7 раза порівняно з контролем.

У результаті обчислення показників неканцерогенного ризику для обрубувача встановлено, що найбільший показник кратності перевищення порівняно з контролем зареєстровано для ЗЧ розміром 48 нм – у 123,5 раза, ЗЧ розміром 154 нм – у 181,7 раза, для ЗЧ розміром 205 нм – у 117,4 раза, що мали найвищий рівень відносного ризику з-поміж УДЧ усіх розмірів, які містяться в промисловому аерозолі (*табл. 4*). ЗЧ інших розмірів мали незначну кратність перевищення – цей показник становив від 26,0 до 92,3 раза. Для ЗЧ великих розмірів, зокрема 273 нм та 365 нм, відносний ризик оцінено як нульовий, оскільки масова концентрація ЗЧ на робочому місці контрольної групи вища порівняно з відповідним показником, що встановлений на робочому місці обрубувача. Показники наведено на *рис. 6*.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для УДЧ промислового аерозолі на робочому місці обрубувача становив $2,53 \times 10^{-2}$ мкг/(кг·добу), що має загальну кратність перевищення RR_{total} у 83,3 раза порівняно з контролем.

Обговорення

Нині в Україні та світі здійснюють чимало досліджень щодо нанобезпеки [14,15,16,17,18], беручи до уваги стрімкий розвиток нанотехнологій і широке впровадження наноматеріалів у різних галузях господарської діяльності. Внаслідок цього значно збільшується кількість працівників, котрі мають безпосередній контакт зі штучно синтезованими наночастинками й УДЧ, що утворюються випадково під час різних технологічних процесів. Тому перед науковцями постає проблема щодо методології оцінювання наноризиків і розроблення ефективних заходів профілактики негативних наслідків.

У роботі О. Г. Белюги та співавт. [17] застосовано адаптований підхід «Смуги контролю» для оцінювання потенційного ризику від впливу вискодисперсних наноматеріалів на робочому місці працівників сільськогосподарства. Оцінювання ризику здійснили за ISO/TS 12901-2:214 «Нанотехнології. Управління професійними ризиком, застосоване до розроблених наноматеріалів. Частина 2: Використання підходу смуг контролю». Автори зазначили, що цей підхід є актуальним і доцільним інструментом для оцінювання ризиків на робочих місцях з невизначеними або невідомими токсикологічними властивостями небезпечних агентів, коли не здійснено кількісне дослідження впливу [19].

Недоліки цього методу полягають у відсутності кількісного оцінювання ризику, а також у тому, що його застосовують як перший етап, який надалі може бути доповнений детальнішими дослідженнями та вимірюваннями. Під час цієї роботи виконано кількісний аналіз ризику, використано чисельні концентрації та масові концентрації УДЧ.

У дослідженні D. Kang et al. [20] визначили й розрахували канцерогенні та неканцерогенні ризики від впливу важких металів, що циркулюють у довкіллі, шляхом визначення коефіцієнтів небезпеки (HQ) та обчислення хронічної добової дози (CDI, chronic daily intake) надходження через органи дихання, шкіру та шлунково-кишковий тракт. У нашій роботі, на відміну від попередньої, досліджено неканцерогенні ризики, застосували коефіцієнти небезпеки (HQ) та обрахували середню добову дозу (LADD) надходження через органи дихання саме УДЧ на робочих місцях працівників.

У науковій роботі Michal Macko et al. [12] наведено один із методів оцінювання ризиків від дії УДЧ, під час обрахунку канцерогенного ризику автори рекомендують враховувати розмір ЗЧ. Автори пропонують оптимізувати метод оцінювання ризиків, що розроблений Агентством з охорони довкілля США (EPA) [20], шляхом додавання двох нових змінних, які враховують розмір наночастинок: множник токсичності та множник розміру. За цією методикою автори пропонують розраховувати канцерогенні ризики для окремих хімічних речовин (канцерогенів). Методика доцільна до застосування під час дослідження робочих місць, де використовують наноматеріали (канцерогени) з відомою хімічною складовою та розміром наночастинок.

Під час різних технологічних процесів ЗЧ, що утворюються випадково, мають комбінований хімічний склад, тому під час нашого дослідження для обрахунку неканцерогенного ризику запропоновано модифікувати формулу Michal Macko et al. [12] і замінити у формулі множник інгаляційного ризику (IUR) для конкретної речовини (канцерогену) на коефіцієнт небезпеки (HQ), що враховує перевищення орієнтовно безпечних рівнів УДЧ на робочих місцях працівників.

Проблема пошуку нових підходів та інструментів для характеристики небезпеки від впливу УДЧ у виробничих умовах, оцінювання їх експозиції та визначення ризику залишається актуальною. Ці дані сприятимуть впровадженню відповідних заходів профілактики на виробництвах.

Висновки

1. Запропоновано нову методику оцінювання неканцерогенного ризику від впливу УДЧ комбінованого хімічного складу для працівників у різних галузях промисловості. Ця методика під час оцінювання ризику враховує показник токсичності, розмір наночастинок і коефіцієнт небезпеки від впливу УДЧ.

2. Обчислені коефіцієнти небезпеки від впливу УДЧ перевищували одиницю для всіх робочих місць. Найбільші коефіцієнти небезпеки встановлено на робочих місцях працівників, які зазнають впливу аерозолі конденсації (НҚ для елементів, щільність яких $>6 \text{ кг/м}^3$: на робочому місці плавильника металу та сплавів – 4,9, електрозварника ручного зварювання – 4,4; НҚ для елементів, щільність яких $<6 \text{ кг/м}^3$ – 2,4 та 2,2 відповідно). Дещо нижчі коефіцієнти встановлено на робочих місцях працівників, які зазнають впливу аерозолі дезінтеграції (НҚ для елементів, щільність яких $>6 \text{ кг/м}^3$: шліфувальника – 2,2, обрубувача – 2,4; НҚ для елементів, щільність яких $<6 \text{ кг/м}^3$ – 1,1 та 1,3 відповідно). Коефіцієнти небезпеки, обраховані для працівників контрольної групи, найменші, не перевищували одиницю (НҚ = 0,4, НҚ = 0,2 відповідно).

3. Результати оцінювання неканцерогенного ризику залежно від розміру УДЧ на робочих місцях працівників машинобудівного підприємства показали: найбільший ризик для плавильника металу та сплавів мають ЗЧ розміром 11 нм і 15 нм (кратність перевищення порівняно з контролем – у 7873 та 2417 разів), для електрозварника ручного зварювання – ЗЧ розміром 11 нм і 64–154 нм, для шліфувальника – ЗЧ розміром 15–48 нм, для обрубувача – ЗЧ розміром 48 нм і 154–205 нм.

Перспективи подальших досліджень полягають в обчисленні й оцінюванні неканцерогенних ризиків для робочих місць працівників під час різних технологічних процесів на машинобудівних і металургійних виробництвах, де є джерела утворення УДЧ. Ці дані сприятимуть впровадженню ефективних заходів з профілактики для зменшення рівнів ризику.

Фінансування

Дослідження здійснено без фінансової підтримки.

Конфлікт інтересів: відсутній.

Conflicts of interest: authors have no conflict of interest to declare.

Надійшла до редакції / Received: 17.04.2025

Після доопрацювання / Revised: 13.05.2025

Схвалено до друку / Accepted: 19.06.2025

Відомості про автора:

Шаравара Л. П., канд. мед. наук, доцент каф. загальної гігієни, медичної екології та профілактичної медицини, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна.
ORCID ID: 0000-0001-9102-3686

Information about the author:

Sharavara L. P., MD, PhD, Associate Professor at the Department of General Hygiene, Medical Ecology, and Preventive Medicine, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Ukraine.



Лариса Шаравара (Larysa Sharavara)
saravalarisa@gmail.com

References

1. Elihn K, Berg P. Ultrafine particle characteristics in seven industrial plants. *Ann Occup Hyg*. 2009;53(5):475-84. doi: [10.1093/annhyg/mep033](https://doi.org/10.1093/annhyg/mep033)
2. Gao X, Zhou X, Zou H, Wang Q, Zhou Z, Chen R, et al. Exposure characterization and risk assessment of ultrafine particles from the blast furnace process in a steelmaking plant. *J Occup Health*. 2021;63(1):e12257. doi: [10.1002/1348-9585.12257](https://doi.org/10.1002/1348-9585.12257)
3. Najahi-Missaoui W, Arnold RD, Cummings BS. Safe Nanoparticles: Are We There Yet? *Int J Mol Sci*. 2020;22(1):385. doi: [10.3390/ijms22010385](https://doi.org/10.3390/ijms22010385)
4. Marcias G, Fostinelli J, Catalani S, Uras M, Sanna AM, Avataneo G, et al. Composition of Metallic Elements and Size Distribution of Fine and Ultrafine Particles in a Steelmaking Factory. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(6):1192. doi: [10.3390/ijerph15061192](https://doi.org/10.3390/ijerph15061192)
5. Demetska OV, Tkachenko TY, Movchan VA, Andrusyshyna IM, Rudoy YE, Vasilyev VI. [Analysis of potential risks in nanotechnologies at workplaces using E-beam device UE-202]. *Ukrainian journal of occupational health*. 2013;2(35):44-9. Ukrainian. doi: [10.33573/ujoh2013.02.044](https://doi.org/10.33573/ujoh2013.02.044)
6. Abouzeinab NS, Kahil N, Fakhruddin N, Awad R, Khalil MI. Intrapertoneal hepato-renal toxicity of zinc oxide and nickel oxide nanoparticles in male rats: biochemical, hematological and histopathological studies. *EXCLI J*. 2023;22:619-44. doi: [10.17179/excli2023-6237](https://doi.org/10.17179/excli2023-6237)
7. Vakili-Ghartavol R, Montazi-Borojeni AA, Vakili-Ghartavol Z, Aiyelabegan HT, Jaafari MR, Rezayat SM, et al. Toxicity assessment of superparamagnetic iron oxide nanoparticles in different tissues. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*. 2020;48(1):443-51. doi: [10.1080/21691401.2019.1709855](https://doi.org/10.1080/21691401.2019.1709855)
8. Huang Y, Li P, Zhao R, Zhao L, Liu J, Peng S, et al. Silica nanoparticles: Biomedical applications and toxicity. *Biomed Pharmacother*. 2022;151:113053. doi: [10.1016/j.biopha.2022.113053](https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113053)
9. Yavorovsky OP, Savosko SI, Riabovol VM, Zinchenko TO. [Toxicological and morphological aspects of nano-TiO2 and nano-TiO2-Ag acute action on the liver of mice]. *Pathologia*. 2023;20(2):162-9. Ukrainian. doi: [10.14739/2310-1237.2023.2.277852](https://doi.org/10.14739/2310-1237.2023.2.277852)
10. Ministry of Health of Ukraine. [On the approval of methodological recommendations "Assessment of health risks to workers from air pollution in the workplace by chemical substances". Order dated 2024 Mar 2 No. 358] [Internet]. 2024 [cited 2025 Apr 21]. Ukrainian. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358282-24#Text>
11. Trachtenberg IM, Yavorovsky OP, Zinchenko TO, Shevtsova VM, Veremey MI. [New information from experience hygienic evaluation of high technology preparation nanometals and potential risks their influence on the workers]. *Likars'ka Sprava*. 2015;(1-2):116-25. Ukrainian. doi: [10.31640/LS-2015-\(1-2\)-22](https://doi.org/10.31640/LS-2015-(1-2)-22)
12. Macko M, Antoš J, Božek F, Konečný J, Huzlík J, Hegrová J, et al. Development of New Health Risk Assessment of Nanoparticles: EPA Health Risk Assessment Revised. *Nanomaterials*. 2023;13(1):20. doi: [10.3390/nano13010020](https://doi.org/10.3390/nano13010020)
13. Yavorovsky OP. [Metal nanoparticles as a global anthropogenic environmental pollutant: industrial hygienic, physicochemical, experimental toxicological and clinical aspects of hazard]. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2025;(4):3-22. Ukrainian. doi: [10.15407/visn2025.04.003](https://doi.org/10.15407/visn2025.04.003)
14. Trachtenberg IM, Dmytrukha NM, Lahutina OS, Korolenko TK, Lehkostup LA, Herasimova OV. [Investigation of hematotoxic effect of micro- and nanoparticles of iron oxide Fe2O3 under single and long-term intake into the body]. *Ukrainian journal of occupational health*. 2021;17(4):215-24. Ukrainian. doi: [10.33573/ujoh2021.04.215](https://doi.org/10.33573/ujoh2021.04.215)
15. Dmytrukha NM. [Nanotoxicology – a new direction in industrial toxicology, task and research results]. *Ukrainian journal of occupational health*. 2023;19(1):61-74. Ukrainian. doi: [10.33573/ujoh2023.01.061](https://doi.org/10.33573/ujoh2023.01.061)
16. Pryor JT, Cowley LO, Simonds SE. The Physiological Effects of Air Pollution: Particulate Matter, Physiology and Disease. *Front Public Health*. 2022;10:882569. doi: [10.3389/fpubh.2022.882569](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.882569)
17. Beluha OG, Demetska OV, Movchan VO, Balia AH. [Potential risk assessment in occupational exposure to highly dispersive materials]. *Ukrainian journal of occupational health*. 2024;20(3):176-83. Ukrainian. doi: [10.33573/ujoh2024.03.176](https://doi.org/10.33573/ujoh2024.03.176)
18. Diami SM, Kusin FM, Madzin Z. Potential ecological and human health risks of heavy metals in surface soils associated with iron ore mining in Pahang, Malaysia. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2016;23(20):21086-97. doi: [10.1007/s11356-016-7314-9](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7314-9)
19. U.S. EPA. Basic information about the integrated risk information system. 2023. Available from: <https://www.epa.gov/iris/basic-information-about-integrated-risk-information-system>
20. Kang D, Lee SH, Kim YJ, Kim TK, Kim JY, Kim Y. Development of Nationwide Excess Lifetime Cancer Risk Evaluation Methods with Comprehensive Past Asbestos Exposure Reconstruction. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(6):2819. doi: [10.3390/ijerph18062819](https://doi.org/10.3390/ijerph18062819)