

Оцінювання професійних ризиків від впливу зважених ультрадисперсних частинок промислового аерозолі для працівників металургійного підприємства

Л. П. Шаравара^{1, A, B, C, D}, Н. М. Дмитруха^{2, C, E, F}, І. М. Андрусишина^{2, C, E, F}

¹Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Україна,

²ДУ «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва» НАМН України, м. Київ

A – концепція та дизайн дослідження; B – збір даних; C – аналіз та інтерпретація даних; D – написання статті; E – редагування статті; F – остаточне затвердження статті

Ключові слова:

металургійне виробництво, ультрадисперсний промисловий аерозоль, канцерогенний ризик, неканцерогенний ризик.

Keywords:

metallurgical production, ultrafine industrial aerosol, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk.

Надійшла до редакції /
Received: 09.06.2025

Після доопрацювання /
Revised: 31.07.2025

Схвалено до друку /
Accepted: 06.08.2025

Конфлікт інтересів:
відсутній.

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

© The Author(s) 2025
This is an open access
article under the
[Creative Commons](#)
[CC BY-NC 4.0 license](#)

Мета роботи – оцінювання професійних ризиків від впливу зважених ультрадисперсних частинок промислового аерозолі для працівників металургійного підприємства.

Матеріали і методи. Дослідження вмісту зважених частинок здійснили на робочих місцях працівників металургійного виробництва. Застосували портативний сканувальний спектрометр Nanoscan 3910 (США). Хімічний склад досліджено методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП) на приладі «Optima 2100 DV» виробництва компанії «PerkinElmer» (США). На підставі даних, що отримали, обрахували канцерогенний і неканцерогенний ризики.

Результати. Встановлено, що у повітрі робочої зони сталевара мартенівської печі загальна чисельна концентрація зважених частинок становила $6,9 \times 10^4$ ($4,0 \times 10^4$; $8,0 \times 10^4$) частинок/см³, у повітрі робочої зони горнового доменної печі – $5,1 \times 10^4$ ($4,5 \times 10^4$; $7,8 \times 10^4$), у повітрі робочої зони агломератника – $2,4 \times 10^4$ ($2,1 \times 10^4$; $5,1 \times 10^4$). Усі показники перевищували загальну чисельну концентрацію зважених частинок працівників контролю і були статистично достовірно вищими ($p < 0,001$). Зважені частинки містили Si, Al, P, Fe, Ca, Mg, Cr та Ni, що зумовлено видом технологічного процесу. Перевищення значень гігієнічних нормативів встановлено для P, Cr та Ni. Обраховані показники канцерогенного ризику для працівників від впливу хрому та нікелю мали високі рівні. Коефіцієнти небезпеки від впливу зважених частинок зі щільністю елементів >6 кг/м³ та <6 кг/м³ для сталевара мартенівської печі становили HQ = 3,15 та HQ = 1,57, для горнового доменної печі – HQ = 2,54 та HQ = 1,27, для агломератника – HQ = 3,15 та HQ = 1,57 відповідно. Найбільший неканцерогенний ризик мали частинки розміром до 64 нм. Кратність перевищення ризику на робочому місці сталевара мартенівської печі порівняно з показником, що встановлений для працівників контрольної групи, становила 224,8 раза, на робочому місці горнового доменної печі – 61,9 раза, на робочому місці агломератника – 12,9 раза.

Висновки. Під час виготовлення агломерату, чавуну та сталі на робочих місцях працівників утворюються зважені частинки з комбінованим хімічним складом. Встановлені величини канцерогенного ризику від впливу хрому та нікелю для всіх працівників мали високий рівень. Коефіцієнти небезпеки від впливу зважених частинок майже для всіх працівників перевищували одиницю, що можна визначити як неприпустимі. Найбільший ризик (залежно від розміру) для всіх працівників мали частинки найменшого розміру (≤ 64 нм).

Сучасні медичні технології. 2025. Т. 17, № 3(66). С. 178-187

Assessment of occupational risks from exposure to suspended ultrafine particles of industrial aerosol for workers of a metallurgical enterprise

L. P. Sharavara, N. M. Dmytrukha, I. M. Andrusyshyna

Aim. To assess occupational risks from exposure to suspended ultrafine particles of industrial aerosol for workers of a metallurgical enterprise.

Materials and methods. The study of the content of suspended particles was carried out at the workplaces of metallurgical production workers using a portable scanning spectrometer Nanoscan 3910 (USA). Their chemical composition was studied by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (OES-ICP) on the device "Optima 2100 DV" manufactured by "PerkinElmer" (USA). Based on the results obtained, carcinogenic and non-carcinogenic risks were calculated.

Results. It was established, that in the air of the working area of the open-hearth furnace steelworker, the total numerical concentration of suspended particles was 6.9×10^4 (4.0×10^4 ; 8.0×10^4) particles/cm³, in the air of the working area of the blast furnace – 5.1×10^4 (4.5×10^4 ; 7.8×10^4), in the air of the sinter plant working

area – 2.4×10^4 (2.1×10^4 ; 5.1×10^4). All indicators exceeded the total numerical concentration of suspended particles of control workers and were statistically significantly higher ($p < 0.001$). The composition of suspended particles included Si, Al, P, Fe, Ca, Mg, Cr and Ni, which is due to the type of technological process. Exceedances of hygienic standards was observed for P, Cr and Ni. The calculated carcinogenic risk indicators for workers from exposure to chromium and nickel were high. The hazard coefficients from exposure to suspended particles with element densities $>6 \text{ kg/m}^3$ and $<6 \text{ kg/m}^3$ for an open-hearth furnace steelworker were $HQ = 3.15$ and $HQ = 1.57$, for a blast furnace worker – $HQ = 2.54$ and $HQ = 1.27$, for a sinter plant worker – $HQ = 3.15$ and $HQ = 1.57$, respectively. The greatest non-carcinogenic risk was caused by particles up to 64 nm in size. The risk excess factor at the workplace of an open-hearth furnace steelworker, compared with workers in the control group, was 224.8 times, at the workplace of a blast furnace worker – 61.9 times, and at the workplace of a sinter plant worker – 12.9 times.

Conclusions. During the production of sinter, cast iron and steel, suspended particles of combined chemical composition are formed at the workplaces of workers. The obtained carcinogenic risk values from exposure to chromium and nickel for all workers were high. The hazard coefficients from exposure to suspended particles for almost all workers exceeded unit, that can be considered unacceptable. The greatest risk, depending on the size, for all workers was posed by the smallest particles ($\leq 64 \text{ nm}$).

Modern medical technology. 2025;17(3):178-187

Металургійна галузь є однією з ключових галузей промисловості, у якій працює значна частина населення України. Умови праці робітників цієї галузі характеризуються високими рівнями професійних ризиків, що зумовлено використанням застарілих технологій у виробництві, зношеністю виробничого обладнання, використанням обладнання, яке не відповідає сучасним стандартам безпеки й екології, особливостями технологічних процесів на різних етапах виробництва тощо [1,2].

3-поміж основних факторів виробничого середовища, які формують несприятливі умови праці, розрізняють несприятливі мікрокліматичні умови та високі рівні інфрачервоного випромінювання, високі концентрації в повітрі робочої зони (ПРЗ) виробничого пилу та шкідливих хімічних речовин, інтенсивні рівні шуму та вібрації, значні фізичні навантаження, високий ризик виробничого травматизму. Названі виробничі фактори спричиняють шкідливі та небезпечні умови праці, особливо в основних цехах металургійної галузі, що задіяні у виробництві агломерату, чавуну, сталі та прокату [3,4,5]. Особливості технологічних процесів у цій галузі не дають змоги повністю усунути вплив небезпечних факторів виробничого середовища на персонал, і тому працівники металургійної галузі належать до групи підвищеного професійного ризику.

Аналіз професійної захворюваності у металургійній галузі дав змогу встановити, що однією з провідних нозологічних форм у структурі професійної патології працівників є хвороби органів дихання [2,3] як наслідок впливу високих концентрацій виробничого пилу та хімічних речовин, що містяться у ПРЗ. Через це актуальними залишаються дослідження фізико-хімічних характеристик промислового аерозолі, особливо частинок ультрадисперсного діапазону [6,7], який вважають одним із факторів ризику розвитку захворювань легень у працівників [8,9,10].

Отже, дослідження вмісту зважених частинок (ЗЧ) ультрадисперсного промислового аерозолі в ПРЗ, а також обрахунків та оцінювання ризиків їхнього впливу на працівників має важливе значення для збереження здоров'я та підвищення безпеки праці в металургійній галузі.

Мета роботи

Оцінювання професійних ризиків від впливу зважених ультрадисперсних частинок промислового аерозолі для працівників металургійного підприємства.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження вмісту кількісної концентрації (частинки/ cm^3) та масової концентрації ($\text{мкг}/\text{м}^3$) зважених ультрадисперсних частинок (УДЧ) здійснили за допомогою портативного сканувального спектрометра Nanoscan 3910 (США), який дає змогу виміряти необхідні показники у діапазоні від 10 нм до 400 нм. Вміст УДЧ визначали на робочих місцях (РМ) працівників металургійного підприємства: сталевара мартенівської печі ($n = 390$), горнового доменної печі ($n = 312$), агломератника агломераційного відділення ($n = 221$). На цьому підприємстві для ведення технологічного процесу у мартенівському цеху задіяно 37 сталеварів мартенівської печі, у доменному цеху – 77 горнових доменної печі, в агломераційному цеху – 44 агломератники.

Хімічний склад зважених УДЧ, що містилися в промисловому аерозолі, оцінювали з використанням приладу «Optima 2100 DV» («PerkinElmer», США) за допомогою методу оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП). Результати опрацьовані за допомогою програмного забезпечення приладу ОЕС-ІЗП WinLab32 в операційній системі Windows XP prof. Оцінювання отриманих даних масової концентрації хімічних речовин здійснили шляхом порівняння їх із гранично допустимими концентраціями (ГДК) для ПРЗ працівників відповідно до «Державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони» (Наказ МОЗ України від 09.07.2024 р. № 1194) [11].

Показники канцерогенного та неканцерогенного ризику обраховували й оцінювали за методичними рекомендаціями «Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами» (Наказ МОЗ України від 02.03.2024 р. № 358) [12].

Для оцінювання канцерогенного ризику здійснили обрахунок індивідуального канцерогенного ризику (ICR) з

використанням факторів канцерогенного потенціалу (SF) для канцерогенів, що наявні у ПРЗ працівників, за формулою:

$$ICR = LADD \times SF, \quad (1)$$

де ICR – індивідуальний канцерогенний ризик для населення протягом усього життя (70 років); LADD – середня добова доза канцерогену, мг/(кг × день).

Середню добову дозу канцерогену, що усереднена за період впливу хімічної речовини, обраховано за формулою:

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

де C – концентрація речовини в ПРЗ, мг/м³; CR – середня величина легеневої вентиляції за робочу зміну (8 годин), м³/день; ED – тривалість впливу, роки, (30 років); EF – частота впливу, днів/рік (251 день); BW – середня маса тіла людини, кг (70 кг); AT – період усереднення експозиції (для канцерогенів AT = 70 років); 365 – кількість днів у році; SF – фактор канцерогенного потенціалу (згідно з базою даних United States Environmental Protection Agency, US EPA).

Обрахунок сумарного канцерогенного ризику (R_{total}) для всіх канцерогенних речовин, що наявні в ПРЗ, здійснили за формулою:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots R_n, \quad (3)$$

де R_{total} – сумарний канцерогенний ризик для працівників при інгаляційному шляху надходження канцерогенів; R_1, R_2, R_n – канцерогенний ризик від кожної окремої речовини (канцерогену) у ПРЗ.

Для оцінювання неканцерогенного ризику обчислили коефіцієнти небезпеки (HQ), що враховують перевищення виміряних чисельних концентрацій (кількість/см³) зважених УДЧ на РМ працівників з орієнтовно безпечними рівнями наночастинок, які рекомендовані фахівцями Інституту професійної безпеки та здоров'я Німеччини (IFA) та Національного інституту охорони праці США (NIOSH). Фахівці рекомендують орієнтовно безпечні рівні для наночастинок металів, оксидів металів та інших наноматеріалів зі щільністю елементів >6 кг/м³ визначати при не більше ніж 20 000 частинок/см³, для наноматеріалів зі щільністю елементів <6 кг/м³ – не більше ніж 40 000 частинок/см³. Коефіцієнти небезпеки обраховано за формулою:

$$HQ = C / RfC, \quad (4)$$

де C – концентрація речовини у ПРЗ; RfC – безпечна концентрація або орієнтовно безпечні рівні.

Обчислені коефіцієнти небезпеки оцінювали так: при HQ >1 є ризик виникнення неканцерогенних ефектів, при HQ <1 рівень впливу допустимий, імовірність виникнення негативних ефектів низька.

Ми запропонували нову методику обрахунку й оцінювання неканцерогенного ризику, враховуючи розмір зважених УДЧ, що містяться у ПРЗ. Ця методика передбачає оцінювання надлишкового життєвого неканцерогенного ризику (ELNCR_i, Excess lifetime non-cancer risk) за модифікованою формулою:

$$ELNCR_i = LADD_i \times HQ_i \times K_t \times K_p, \quad (5)$$

де LADD_i – середня добова доза надходження ЗЧ різного розміру, мкг/(кг×день); HQ_i – коефіцієнт небезпеки, обчислений для різних за розміром ЗЧ; K_t – коефіцієнт токсичності залежно від розміру ЗЧ; K_p – коефіцієнт розмірності частинок залежно від розміру ЗЧ.

Показник середньої добової дози надходження LADD_i зважених УДЧ обраховано за формулою (2), коефіцієнт небезпеки – за формулою (4), відповідно до методичних рекомендацій «Оцінка ризиків для здоров'я працівників від забруднення повітря робочої зони хімічними речовинами». Також за запропонованою методикою обраховано частку (Fraction, F) ЗЧ окремих розмірів (C_i) у складі загальної масової концентрації ЗЧ (C_{total}) промислового аерозолі, вимірюного на РМ працівника за формулами:

$$F_i = C_i / C_{total} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1. \quad (7)$$

Неканцерогенний ризик (R_i) оцінено, враховуючи показники надлишкового життєвого неканцерогенного ризику різних за розміром частинок (ELNCR_i) та частки (F_i) ЗЧ різних розмірів у складі загальної масової концентрації за формулою:

$$R_i = ELNCR_i \times F_i. \quad (8)$$

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) визначено шляхом підсумовування індивідуальних ризиків (R_i), обрахованих для кожної фракції ЗЧ різних розмірів. Для цього використали формулу:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (9)$$

На завершальному етапі оцінювання неканцерогенного ризику запропоновано обраховувати відносний ризик (RR) за формулою (10), який дає змогу кількісно визначити, у скільки разів неканцерогенний ризик на РМ працівника (R_{i на РМ}) перевищує фоновий рівень, характерний для умов, де немає джерел утворення УДЧ (R_{i контроль}):

$$RR_i = R_{i на РМ} / R_{i контроль}. \quad (10)$$

Статистичний аналіз даних здійснили з використанням ліцензійного програмного пакета Statistica версія 13 (Copyright 19842018 TIBCO Software Inc., ліцензія № JPZ804I382130ARCN10-J). Для перевірки відповідності закону нормального розподілу кількісних показників застосовано критерій Шапіро–Вілкі. Оскільки розподіл усіх показників не відповідав нормальному закону, описову статистику наведено як медіану та міжквартильний розмах – Me (Q25; Q75). Статистичну значущість відмінностей між групами, що порівнювали, оцінено за допомогою U-критерію Манна–Вітні. Вірогідними вважали відмінності при рівні значущості p ≤ 0,05.

Результати

У результаті дослідження вмісту зважених УДЧ у ПРЗ працівників металургійного підприємства вони визначені у різних кількісних концентраціях. Так, на РМ сталевара мартенівської печі кількісна концентрація зважених УДЧ становила 6,9 × 10⁴

Таблиця 1. Хімічний склад зважених УДЧ у ПРЗ працівників металургійного підприємства на різних ділянках

Хімічний елемент	Сталевар мартенівської печі		Горновий доменної печі		Агломератник		ГДК
	Min / max	Me (Q25; Q75)	Min / max	Me (Q25; Q75)	Min / max	Me (Q25; Q75)	
Al	0,0006 / 0,0050	0,0020 (0,0012; 0,0035)	0,0093 / 0,0007	0,0038 (0,0013; 0,0075)	0,0007 / 0,0060	0,004 (0,001; 0,006)	6,0
Ca	0,003 / 0,004	0,0040 (0,0039; 0,0040)	–	–	–	–	1,0
Fe	–	–	0,007 / 0,010	0,007 (0,007; 0,008)	0,0017 / 0,0043	0,003 (0,002; 0,004)	6,0
Mg	0,002 / 0,007	0,0029 (0,002; 0,005)	0,002 / 0,009	0,006 (0,005; 0,007)	0,0011 / 0,0030	0,0020 (0,0017; 0,0020)	4,0
Si	0,26 / 0,50	0,38 (0,34; 0,44)	0,590 / 0,799	0,640 (0,620; 0,699)	–	–	1,0
P	–	–	0,10 / 0,53	0,18 (0,14; 0,38)	0,39 / 0,64	0,49 (0,42; 0,58)	0,2
Cr	1,61 / 2,25	1,72 (1,66; 1,88)	1,12 / 1,89	1,36 (1,33; 1,81)	1,30 / 2,24	1,77 (1,32; 2,21)	1,0
Ni	0,80 / 2,94	1,14 (0,99; 1,64)	0,88 / 2,54	1,55 (1,12; 1,60)	3,40 / 3,64	3,52 (3,44; 3,61)	0,05

ГДК: згідно з «Державними медико-санітарними нормативами допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони», що затверджені Наказом МОЗ України від 09.07.2024 р. № 1194.

($4,0 \times 10^4$; $8,0 \times 10^4$), діапазон – від $1,7 \times 10^4$ до $2,6 \times 10^5$ частинок/см³. У ПРЗ горнового доменної печі кількісна концентрація становила $5,1 \times 10^4$ ($4,5 \times 10^4$; $7,8 \times 10^4$) з коливанням у межах від $3,9 \times 10^4$ до $2,2 \times 10^5$ частинок/см³. Для агломератника агломераційного цеху кількісна концентрація зважених УДЧ найменша, становила $2,4 \times 10^4$ ($2,1 \times 10^4$; $5,1 \times 10^4$), діапазон – від $2,1 \times 10^4$ до $7,6 \times 10^4$ частинок/см³. Загальні показники кількісної концентрації зважених УДЧ усіх працівників перевищували відповідний показник для РМ працівників контролю $1,5 \times 10^4$ ($1,45 \times 10^4$; $1,6 \times 10^4$): у 4,6 раза ($p < 0,001$) – для РМ сталевара мартенівської печі; у 3,4 раза ($p < 0,001$) – для РМ горнового доменної печі; в 1,6 раза ($p < 0,001$) – для РМ агломератника. Порівняно з контролем статистично вірогідно більшою для всіх працівників була кількісна концентрація зважених УДЧ розміром 11–154 нм ($p \leq 0,05$), частинки більшого розміру не мали статистично вірогідних відмінностей.

У результаті дослідження хімічного складу зважених (завислих) УДЧ промислового аерозолі встановлено, що до складу ЗЧ входили різні хімічні речовини (табл. 1). Їх вміст оцінювали згідно з «Державними медико-санітарними нормативами допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони», які затверджені Наказом МОЗ України від 09.07.2024 р. № 1194.

Встановлено, що перевищення ГДК у ПРЗ визначено за вмістом фосфору на РМ агломератника – у 2,45 раза; за вмістом хрому на РМ сталевара мартенівської печі – в 1,72 раза, на РМ горнового доменної печі – в 1,36 раза, на РМ агломератника – в 1,77 раза; за вмістом нікелю на РМ сталевара мартенівської печі – у 22,8 раза, на РМ горнового доменної печі – у 31 раз, на РМ агломератника – у 70 разів. Інші хімічні елементи, виявлені в ПРЗ, не мали перевищення

ГДК та відповідали гігієнічним вимогам відповідно до чинних нормативів. Втім, зауважимо, що визначені хімічні речовини містяться у ПРЗ у нанорозмірному діапазоні, і це підвищує ризик розвитку негативних наслідків навіть без перевищення ГДК.

Наголосимо, що у ПРЗ працівників металургійного підприємства містяться канцерогенні речовини, що, за даними Міжнародної агенції з вивчення раку (МАВР), належать до першої групи (безумовно канцерогенні для людини) – хром, а також другої групи А (ймовірно, канцерогенні для людини) – нікель.

У результаті обрахунку канцерогенного ризику визначено середню концентрацію хрому за весь період усереднення впливу для сталевара мартенівської печі на робочому майданчику під час плавлення сталі – $LADD = 7,24 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для агломератника агломераційної машини № 1 у пульті управління під час спікання агломерату – $7,22 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу), для агломератника у головній частині агломераційної машини № 1 при завантажуванні шихти – $5,22 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для агломератника у хвостовій частині агломераційної машини № 1 – $4,69 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для горнового доменної печі під час плавлення чавуну на ливарному майданчику – $5,73 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу).

Величина індивідуального канцерогенного ризику (ICR) від впливу хрому, що обрахували, становила для сталевара мартенівської печі 3,04 (високий рівень ризику), для агломератника в пульті управління під час спікання агломерату – 3,03 (високий рівень ризику), для агломератника у головній частині агломераційної машини № 1 при завантажуванні шихти – 2,19 (високий рівень ризику), для агломератника у хвостовій частині агломераційної машини № 1 – 1,97 (високий рівень ризику), для горнового доменної печі – 2,40 (високий рівень ризику).

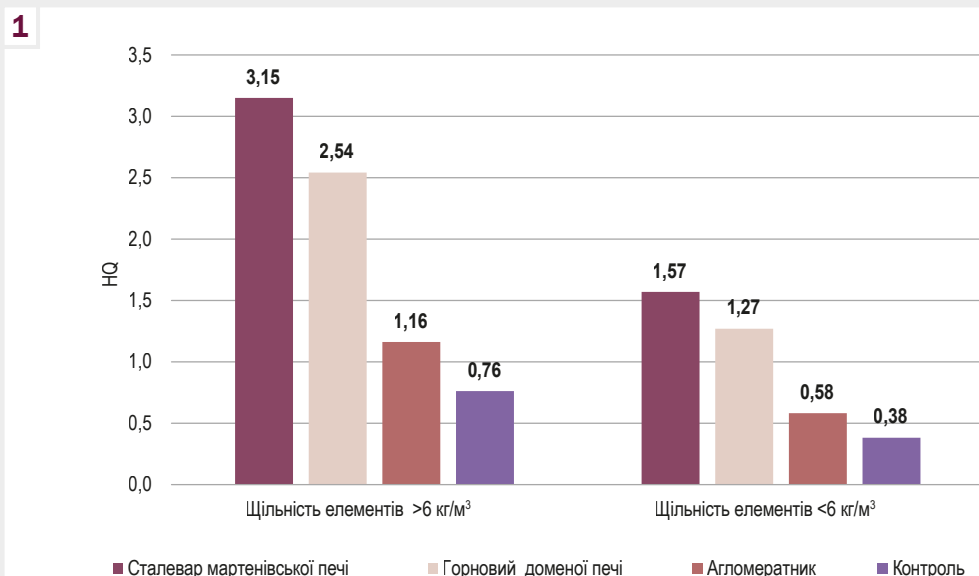


Рис. 1. Коефіцієнти небезпеки (HQ) від впливу зважених УДЧ на РМ працівників металургійного підприємства.

У результаті обрахунку канцерогенного ризику визначено середню концентрацію нікелю за весь період усереднення впливу для сталевара на робочому майданчику мартенівської печі під час плавлення сталі – $LADD = 4,81 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для агломератника агломераційної машини № 1 у пульті управління під час спікання агломерату – $5,84 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для агломератника у головній частині агломераційної машини № 1 при завантажуванні шихти – $1,03 \times 10^{-1}$ мг/(кг × добу); для агломератника у хвостовій частині агломераційної машини № 1 – $7,40 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу); для горнового доменної печі під час плавлення чавуну на ливарному майданчику – $6,48 \times 10^{-2}$ мг/(кг × добу).

Величина індивідуального канцерогенного ризику (ICR) від впливу нікелю становила для сталевара мартенівської печі $4,38 \times 10^{-2}$ (високий рівень ризику); для агломератника в пульті управління під час спікання агломерату – $5,31 \times 10^{-2}$ (високий рівень ризику); для агломератника у головній частині агломераційної машини № 1 при завантажуванні шихти – $9,41 \times 10^{-2}$ (високий рівень ризику); для агломератника у хвостовій частині агломераційної машини № 1 – $6,73 \times 10^{-2}$ (високий рівень ризику); для горнового доменної печі – $5,90 \times 10^{-2}$ (високий рівень ризику).

Ранжування сумарних канцерогенних ризиків таке: РМ агломератника в пульті управління ($R_{total} = 3,09$) та РМ сталевара мартенівської печі ($R_{total} = 3,09$) > РМ агломератника у головній частині агломераційної машини ($R_{total} = 2,29$) > РМ горнового доменної печі ($R_{total} = 2,46$) > РМ агломератника у хвостовій частині агломераційної машини ($R_{total} = 2,04$).

Обчислені коефіцієнти небезпеки для зважених УДЧ на РМ працівників металургійного підприємства наведено на рис. 1. Встановлено, що всі обчислені коефіцієнти небезпеки перевищували допустимі ($HQ \geq 1$) рівні ризику, крім працівників контрольної групи, які не мали джерел утворення зважених УДЧ на РМ. Для агломератників коефіцієнт небезпеки для

ЗЧ, що містять хімічні елементи зі щільністю <6 кг/м³, також не перевищував допустимий рівень ризику.

За методикою, що запропонували, обчислено показники неканцерогенного ризику для сталевара мартенівської печі. Результати наведено в таблиці 2.

У результаті оцінювання неканцерогенного ризику на РМ сталевара мартенівської печі встановлено, що найбільший відносний ризик – від частинок розміром від 36 нм до 115 нм; максимальну кратність перевищення мали частинки розміром 68 нм (у 3120 разів) та 48 нм (у 2366 разів) (рис. 2). ЗЧ інших розмірів мали перевищення ризику порівняно з контролем у межах від 12 до 98 разів. Зважені УДЧ більшого розміру (>205 нм), за результатами дослідження ПРЗ сталевара мартенівської печі, не визначено.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для зважених УДЧ промислового аерозолі, що міститься у ПРЗ сталевара мартенівської печі, становив $3,29 \times 10^{-1}$ мкг/(кг × добу); загальний рівень неканцерогенного ризику (R_{total}) для працівників контрольної групи – $1,34 \times 10^{-1}$ мкг/(кг × добу); кратність перевищення рівня ризику на цьому РМ порівняно з контролем – у 224,8 раза.

Обчислені показники неканцерогенного ризику залежно від розміру зважених частинок для горнового доменної печі наведено в таблиці 3.

На РМ горнового доменної печі найбільші рівні ризиків встановлені для частинок розміром 11 нм (кратність перевищення – у 1335,9 раза), 15 нм (кратність перевищення – у 624,4 раза), 48 нм (кратність перевищення – у 666,3 раза) та частинок розміром 64 нм (кратність перевищення – у 401,0 раза) (рис. 3). ЗЧ розміром 273 нм і 365 нм на РМ горнового доменної печі під час дослідження не визначено.

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для зважених УДЧ промислового аерозолі, що встановлений у ПРЗ горнового доменної печі, становив $8,33 \times 10^{-1}$

Таблиця 2. Показники неканцерогенного ризику для сталевара мартенівської печі залежно від розміру зважених УДЧ промислового аерозолі

Розмір, нм	LADD, мкг/(кг × добу)		ELNCR, мкг/(кг × добу)		R, мкг/(кг × добу)		RR
	Сталевар	Контроль	Сталевар	Контроль	Сталевар	Контроль	
11	0,000115	$1,38 \times 10^{-5}$	$4,46 \times 10^{-2}$	$1,86 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-6}$	$1,85 \times 10^{-8}$	98,4
15	0,000367	$8,71 \times 10^{-5}$	$7,51 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$9,80 \times 10^{-6}$	$6,70 \times 10^{-7}$	14,6
20	0,000980	0,000247	$6,76 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$	$2,36 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-6}$	12,2
27	0,005719	0,000820	$3,87 \times 10^{-1}$	$1,99 \times 10^{-2}$	$7,88 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-5}$	66,6
36	0,026796	0,001730	1,50	$1,57 \times 10^{-2}$	$1,43 \times 10^{-2}$	$1,97 \times 10^{-5}$	729,4
48	0,085896	0,003747	1,60	$7,60 \times 10^{-3}$	$4,88 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-5}$	2366,2
64	0,258266	0,010276	$6,43 \times 10^{-1}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$5,91 \times 10^{-2}$	$1,89 \times 10^{-5}$	3120,2
86	0,569409	0,034805	$5,44 \times 10^{-1}$	$5,08 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-1}$	$1,28 \times 10^{-4}$	860,7
115	0,916459	0,051728	$2,46 \times 10^{-1}$	$3,63 \times 10^{-3}$	$8,01 \times 10^{-2}$	$2,52 \times 10^{-4}$	318,4
154	0,946299	0,103444	$4,65 \times 10^{-2}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,57 \times 10^{-2}$	$3,65 \times 10^{-4}$	42,9
205	–	0,206801	–	$1,43 \times 10^{-3}$	–	$3,11 \times 10^{-4}$	0
273	–	0,413354	–	$5,93 \times 10^{-4}$	–	$1,52 \times 10^{-4}$	0
365	–	0,825888	–	$2,27 \times 10^{-4}$	–	$6,36 \times 10^{-5}$	0
Загальний	2,81	1,65	$1,77 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$3,29 \times 10^{-1}$	$1,34 \times 10^{-1}$	224,8

Таблиця 3. Показники неканцерогенного ризику для горнового доменної печі залежно від розміру зважених УДЧ промислового аерозолі

Розмір, нм	LADD, мкг/(кг × добу)		ELNCR, мкг/(кг × добу)		R, мкг/(кг × добу)		RR
	Горновий	Контроль	Горновий	Контроль	Горновий	Контроль	
11	0,000269	$1,38 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-1}$	$1,86 \times 10^{-3}$	$2,47 \times 10^{-5}$	$1,85 \times 10^{-8}$	1335,9
15	0,001260	$8,71 \times 10^{-5}$	$8,92 \times 10^{-1}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$4,18 \times 10^{-4}$	$6,70 \times 10^{-7}$	624,4
20	0,002595	0,000247	$4,73 \times 10^{-1}$	$1,07 \times 10^{-2}$	$4,56 \times 10^{-4}$	$1,93 \times 10^{-6}$	237,1
27	0,006647	0,000820	$5,23 \times 10^{-1}$	$1,99 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-5}$	109,5
36	0,019587	0,001730	$8,04 \times 10^{-1}$	$1,57 \times 10^{-2}$	$5,86 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-5}$	297,8
48	0,055472	0,003747	$6,66 \times 10^{-1}$	$7,60 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-5}$	666,3
64	0,128422	0,010276	$1,59 \times 10^{-1}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$7,59 \times 10^{-3}$	$1,89 \times 10^{-5}$	401,0
86	0,296896	0,034805	$1,48 \times 10^{-1}$	$5,08 \times 10^{-3}$	$1,63 \times 10^{-2}$	$1,28 \times 10^{-4}$	127,5
115	0,598136	0,051728	$1,05 \times 10^{-1}$	$3,63 \times 10^{-3}$	$2,33 \times 10^{-2}$	$2,52 \times 10^{-4}$	92,5
154	0,877691	0,103444	$4,00 \times 10^{-2}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$3,65 \times 10^{-4}$	35,8
205	0,701298	0,206801	$4,53 \times 10^{-3}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-3}$	$3,11 \times 10^{-4}$	3,8
273	–	0,413354	–	$5,93 \times 10^{-4}$	–	$1,52 \times 10^{-4}$	–
365	–	0,825888	–	$2,27 \times 10^{-4}$	–	$6,36 \times 10^{-5}$	–
Загальний	2,69	1,65	$1,50 \times 10^{-1}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$8,33 \times 10^{-1}$	$1,34 \times 10^{-1}$	61,9

мкг/(кг × добу), загальний рівень неканцерогенного ризику (R_{total}) для працівників контрольної групи – $1,34 \times 10^{-1}$ мкг/(кг × добу); кратність перевищення рівня ризику на цьому робочому місці порівняно з контролем – у 61,9 раза.

Результати оцінювання неканцерогенного ризику для РМ агломератника наведено в таблиці 4.

На РМ агломератника в агломераційному цеху найбільші рівні ризиків встановлено для частинок розміром 11 нм (кратність перевищення – у 57 разів) та 36 розміром 36 нм (кратність перевищення – у 118,9 раза), 48 нм (кратність перевищення – у 331,2 раза) та 64 нм (кратність перевищення – у 157,4 раза) (рис. 4). 36 розміром 273 нм на РМ агломератника

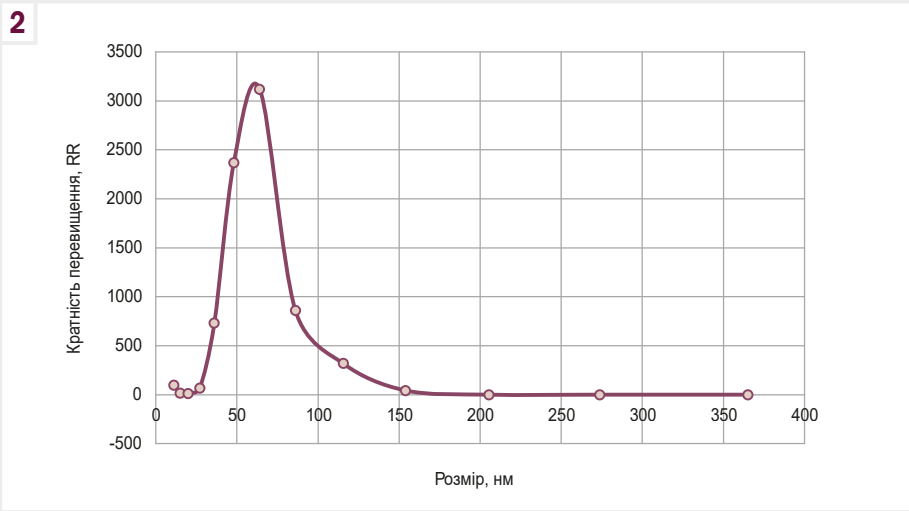


Рис. 2. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення зважених УДЧ різного розміру на РМ сталевара мартенівської печі порівняно з контролем.

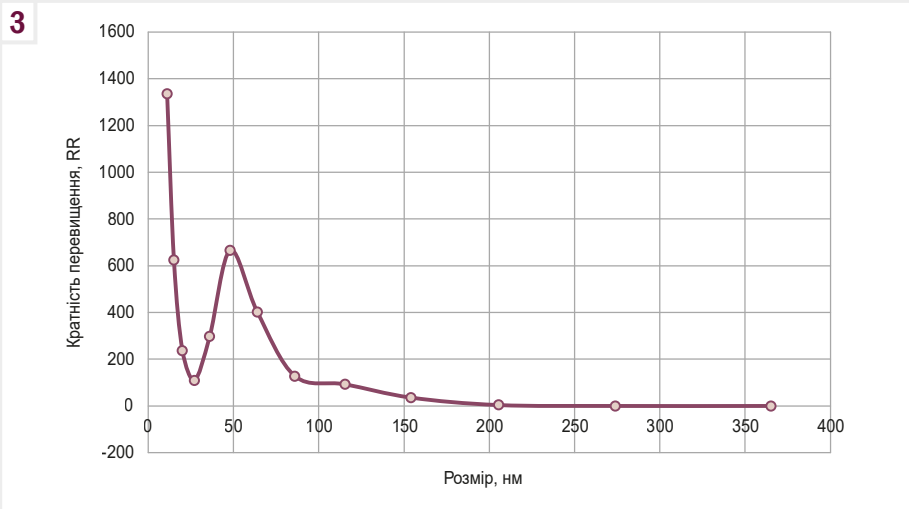


Рис. 3. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення зважених УДЧ різного розміру на РМ горнового доменної печі порівняно з контролем.

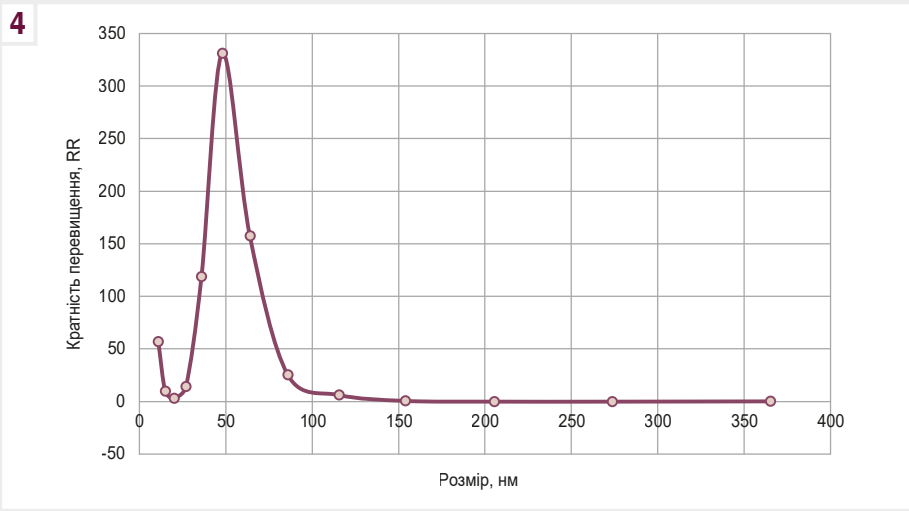


Рис. 4. Відносний ризик (RR) або кратність перевищення зважених УДЧ різного розміру на РМ агломератника порівняно з контролем.

Таблиця 4. Показники неканцерогенного ризику для агломератника залежно від розміру зважених УДЧ промислового аерозолю

Розмір, нм	LADD, мкг/(кг × добу)		ELNCR, мкг/(кг × добу)		R, мкг/(кг × добу)		RR
	Агломератник	Контроль	Агломератник	Контроль	Агломератник	Контроль	
11	$5,61 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-5}$	$1,63 \times 10^{-2}$	$1,86 \times 10^{-3}$	$1,06 \times 10^{-6}$	$1,85 \times 10^{-8}$	57,0
15	0,000192	$8,71 \times 10^{-5}$	$3,02 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$6,70 \times 10^{-6}$	$6,70 \times 10^{-7}$	9,9
20	0,000369	0,000247	$1,35 \times 10^{-2}$	$1,07 \times 10^{-2}$	$5,75 \times 10^{-6}$	$1,93 \times 10^{-6}$	2,9
27	0,002053	0,000820	$7,14 \times 10^{-2}$	$1,99 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-5}$	14,3
36	0,008785	0,001730	2,31E-01	$1,57 \times 10^{-2}$	$2,34 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-5}$	118,9
48	0,026764	0,003747	2,21E-01	$7,60 \times 10^{-3}$	$6,83 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-5}$	331,2
64	0,057258	0,010276	$4,51 \times 10^{-2}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$2,98 \times 10^{-3}$	$1,89 \times 10^{-5}$	157,4
86	0,105339	0,034805	$2,66 \times 10^{-2}$	$5,08 \times 10^{-3}$	$3,23 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-4}$	25,2
115	0,148823	0,051728	$9,26 \times 10^{-3}$	$3,63 \times 10^{-3}$	$1,59 \times 10^{-3}$	$2,52 \times 10^{-4}$	6,3
154	0,142477	0,103444	$1,51 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$2,47 \times 10^{-4}$	$3,65 \times 10^{-4}$	0,7
205	0,045617	0,206801	$2,74 \times 10^{-5}$	$1,43 \times 10^{-3}$	$1,44 \times 10^{-6}$	$3,11 \times 10^{-4}$	0,004
273	–	0,413354	–	$5,93 \times 10^{-4}$	–	$1,52 \times 10^{-4}$	–
365	0,329778	0,825888	$4,43 \times 10^{-5}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$1,68 \times 10^{-5}$	$6,36 \times 10^{-5}$	0,3
Загальний	0,86	1,65	$2,01 \times 10^{-2}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$1,74 \times 10^{-2}$	$1,34 \times 10^{-1}$	12,9

під час дослідження не визначено. ЗЧ інших розмірів мали незначні перевищення (від 0,004 до 25,2 раза).

Загальний показник неканцерогенного ризику (R_{total}) для зважених УДЧ промислового аерозолю, що міститься у ПРЗ агломератника, становив $1,74 \times 10^{-2}$ мкг/(кг × добу), загальний рівень неканцерогенного ризику (R_{total}) для працівників контрольної групи – $1,34 \times 10^{-1}$ мкг/(кг × добу); кратність перевищення рівня ризику на цьому РМ порівняно з контролем – у 12,9 раза.

Обговорення

Результати дослідження підтверджують наявність зважених УДЧ у ПРЗ працівників металургійного підприємства під час високотермічних процесів з виготовлення агломерату, чавуну та сталі. Ці дані збігаються з результатами, які встановлені під час попередніх досліджень [7, 13]. Встановлено високу кількісну концентрацію ЗЧ ультрадисперсного діапазону у ПРЗ працівників під час лиття та плавлення металу; ці дані підтверджено за даними нашого дослідження. Дослідники встановили, що серед металів, які входили до складу ЗЧ, – Fe, Zn, Mn і Pb, дещо менше – Al, Cu, Ni. У нашому дослідженні ЗЧ містили Cr, Ni, Si та P у найбільших концентраціях, Al, Ca, Fe та Mg – у менших. Такі відмінності хімічного складу ЗЧ можуть залежати від технологічного процесу, а також тим, що дослідження здійснено під час різних етапів виробничого циклу.

У дослідженні R. Jan et al. [14] обраховано коефіцієнти небезпеки та канцерогенні ризики для населення мегаполісу від впливу зважених частинок фракцією $PM_{2,5}$ та PM_{10} із різним хімічним складом, що утворюються під час викидів промислових підприємств, спалювання вугілля, роботи транспорту тощо. Встановлено, що коефіцієнти небезпеки для різних за

хімічним складом ЗЧ перевищували одиницю, а обраховані канцерогенні ризики мали перевищення допустимих рівнів. Під час нашого дослідження обраховано коефіцієнти небезпеки та канцерогенні ризики для зважених УДЧ (нанорозмірний діапазон) на РМ працівників металургійного виробництва, які перебувають у безпосередній близькості від джерел їх утворення. Ці коефіцієнти небезпеки перевищували одиницю, а отже є завищеними.

Під час дослідження, що здійснили S. Jena et al. [15], оцінювали канцерогенні ризики у гірничодобувній промисловості. У результаті встановлено високі рівні ризиків для працівників цієї галузі. Показники, що встановлені під час нашого дослідження, щодо канцерогенних ризиків для Cr та Ni, так само, як і в праці [15], мали високі рівні для всіх працівників.

Канцерогенні та неканцерогенні ризики для окремих хімічних речовин у ПРЗ металургійного підприємства обраховано у праці R. Esmaeili et al. [16]. Автори встановили, що для операторів доменної печі рівень канцерогенного ризику Ni прийнятний, а відповідний показник для Cr – неприйнятний. Крім того, у більшості операторів визначено високий рівень неканцерогенного ризику Mn та Fe. Дослідження, яке ми здійснили, відрізняється тим, що визначено неканцерогенні ризики для зважених УДЧ комбінованого хімічного складу саме у нанорозмірному діапазоні.

Канцерогенні ризики окремо для різних канцерогенів, що містяться у ПРЗ працівників, запропоновано обраховувати з використанням коефіцієнта розміру УДЧ та коефіцієнта токсичності [17]. У нашому дослідженні, на відміну від цього, запропоновано оцінювати неканцерогенні ризики для зважених УДЧ комбінованого хімічного складу для різних за розміром ЗЧ з визначенням найбільш небезпечних. За даними фахової літератури [8, 9, 10], доведено: саме розмір ЗЧ впли-

ває на рівень їхньої токсичності. Під час нашого дослідження обчислено й встановлено кратність перевищення загальної кількісної концентрації зважених УДЧ на РМ працівників на різних ділянках металургійного підприємства порівняно з контрольною групою. Крім того, визначено розмір ЗЧ, що мають найвищий рівень ризику для працівників.

Зауважимо, що цю методику можна використовувати для обрахунку й оцінювання ризиків на одному РМ під час різних технологічних операцій, на різних РМ з утворенням промислового аерозолі конденсації чи дезінтеграції для визначення більш небезпечних РМ чи технологічних процесів. Отримані дані надалі можна використовувати в системі управління професійними ризиками від впливу ультрадисперсних ЗЧ на підприємствах металургійної та інших галузей промисловості.

Отже, за результатами дослідження, визначення розміру ЗЧ та їхнього хімічного складу треба вважати необхідним етапом для оцінювання професійного ризику на промислових підприємствах, де є технологічні умови для їх утворення. Це дасть змогу отримати необхідну інформацію щодо можливих ризиків для здоров'я працівників.

Висновки

1. Під час виготовлення агломерату, чавуну та сталі в ПРЗ вивільняється значна кількість зважених УДЧ. Загальна кількість зважених УДЧ під час виробництва агломерату, чавуну та сталі статистично достовірно більша ($p \leq 0,001$) порівняно з показниками, що встановлені на РМ працівників контрольної групи; статистично вірогідну різницю встановлено для ЗЧ розміром від 11 нм до 154 нм.

2. Зважені УДЧ, що містилися в ПРЗ, включали такі хімічні елементи: Al, Fe, Mg, Si, P, Ca, Cr та Ni. Це зумовлено особливостями технологічного процесу на різних ділянках виробництва. Значні перевищення ГДК у ПРЗ всіх працівників мали хімічні речовини, що належать до канцерогенів (Cr та Ni).

3. Обчислено показники канцерогенного ризику від впливу хрому та нікелю для сталевара мартенівської печі ($ICR_{Cr} = 4,38 \times 10^{-2}$; $ICR_{Ni} = 3,04$), агломератника на ділянці спікання агломерату ($ICR_{Cr} = 5,31 \times 10^{-2} - 9,41 \times 10^{-2}$; $ICR_{Ni} = 1,97 - 3,03$) та горнового доменної печі ($ICR_{Cr} = 5,90 \times 10^{-2}$; $ICR_{Ni} = 2,40$). На підставі цих даних визначено високий рівень ризику.

4. Коефіцієнти небезпеки (HQ) від впливу зважених УДЧ зі щільністю елементів $>6 \text{ кг/м}^3$ та $<6 \text{ кг/м}^3$ майже для всіх працівників перевищували одиницю, що є неприпустимим (ризик виникнення неканцерогенних ефектів): сталевар мартенівської печі – HQ = 3,15 та HQ = 1,57; горновий доменної печі – HQ = 2,54 та HQ = 1,27; агломератник – HQ = 3,15 та HQ = 1,57 відповідно.

5. Найбільший ризик на РМ сталевара мартенівської печі (залежно від розміру зважених УДЧ) становлять ЗЧ розмірами 48 нм і 68 нм; горнового доменної печі – 11 нм і 15 нм; агломератника – 36 нм, 48 нм і 64 нм. Кратність перевищення зважених УДЧ порівняно з працівниками контрольної групи на РМ сталевара мартенівської печі становила 224,8 раза, на РМ горнового доменної печі – 61,9 раза, на РМ агломератника – 12,9 раза.

Фінансування

Дослідження здійснено без фінансової підтримки.

Відомості про авторів:

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

Дмитруха Н. М., д-р біол. наук, старший науковий співробітник, зав. лабораторії промислової токсикології і гігієни праці при використанні хімічних речовин, ДУ «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України», м. Київ.

ORCID ID: 0000-0001-9161-3889

Андрусишина І. М., д-р біол. наук, старший науковий співробітник, зав. сектора з вивчення мікроелементозів, ДУ «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України», м. Київ.

ORCID ID: 0000-0001-5827-3384

Information about the authors:

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

Dmytrukha N. M., PhD, DSc, Senior Researcher, Head of the Laboratory of Industrial Toxicology and Occupational Health in the Use of Chemical Substances, State Institution "Kundiiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine.

Andrusyshyna I. M., PhD, DSc, Senior Researcher, Head of Sector for the Study of Microelements, State Institution "Kundiiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv.



Лариса Шаравара (Larysa Sharavara)

saravalarisa@gmail.com

References

- Belokon KV, Troicka OO, Ryzhkov VG. [Analysis of harmful and dangerous productive factors of electrometallurgy production]. Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences). 2019;(1):150-6. Ukrainian. doi: 10.31319/2519-2884.34.2019.29
- Prodanchuk MH, Basanets AV, Kravchuk OP, Hashynova KY, Hvozdetzky VA. [Analysis of the dynamics of occupational morbidity and its consequences in Ukraine in comparison with other countries of the world]. Medicni perspektivi. 2023;28(3):137-52. Ukrainian. doi: 10.26641/2307-0404.2023.3.289217
- Pavlenko OI. [Determination of the permissible period of work in the conditions of modern metallurgical production]. Collection of scientific works of staff member of PL Shupyk NMAPE. 2018;(29):380-92. Ukrainian. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpsnmapo_2018_29_37
- Sharavara LP, Dmytrukha NM. [Working conditions as a risk factor for the health of employees of a metallurgical enterprise]. Bulletin of problems biology and medicine. 2024;1:126-38. Ukrainian. doi: 10.29254/2077-4214-2024-1-172-126-1374
- Oriekhova OV. Suchasnyi stan umov pratsi v metalurhiinomu vyrobnytstvi Ukrainy [The current state of working conditions at metallurgical enterprises of Ukraine]. ScienceRise. Medical science. 2016;(10):34-39. Ukrainian. doi: 10.15587/2519-4798.2016.79865
- Sharavara LP, Dmytrukha NM, Andrusyshyna IM. Ultrafine industrial aerosol as an occupational risk factor for sintering industry workers. Modern medical technology. 2024;16(4):303-9. doi: 10.14739/mmt.2024.4.311754
- 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
- Calderón-Garcidueñas L, Ayala A. Air Pollution, Ultrafine Particles, and Your Brain: Are Combustion Nanoparticle Emissions and Engineered Nanoparticles Causing Preventable Fatal Neurodegenerative Diseases and Common Neuropsychiatric Outcomes? Environ Sci Technol. 2022;56(11):6847-56. doi: 10.1021/acs.est.1c04706

9. Liu NM, Miyashita L, Maher BA, McPhail G, Jones CJ, Barratt B, et al. Evidence for the presence of air pollution nanoparticles in placental tissue cells. *Sci Total Environ*. 2021;751:142235. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.142235](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142235)
10. 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)
11. Ministry of Health of Ukraine. [On approval of state medical and sanitary standards for the permissible content of chemical and biological substances in the air of the working area zone]. Order dated 2024 Jul 9, No. 1192 [Internet]. 2025 Apr 11 [cited 2025 May 26]. Ukrainian. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text>
12. Ministry of Health of Ukraine. [Methodological recommendations "Assessment of risks to workers' health from air pollution in the work area with chemicals"]. Order dated 2024 Mar 2, No. 358 [Internet]. 2024 [cited 2025 May 26]. Ukrainian. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358282-24#Text>
13. Järvelä M, Huvinen M, Viitanen AK, Kanerva T, Vanhala E, Uitti J, et al. Characterization of particle exposure in ferrochromium and stainless steel production. *J Occup Environ Hyg*. 2016;13(7):558-68. doi: [10.1080/15459624.2016.1159687](https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1159687)
14. Jan R, Roy R, Yadav S, Satsangi PG. Chemical fractionation and health risk assessment of particulate matter-bound metals in Pune, India. *Environ Geochem Health*. 2018 Feb;40(1):255-70. doi: [10.1007/s10653-016-9900-7](https://doi.org/10.1007/s10653-016-9900-7)
15. Jena S, Perwez A, Singh G. Trace element characterization of fine particulate matter and assessment of associated health risk in mining area, transportation routes and institutional area of Dhanbad, India. *Environ Geochem Health*. 2019;41(6):2731-47. doi: [10.1007/s10653-019-00329-z](https://doi.org/10.1007/s10653-019-00329-z)
16. Esmaeili R, Ebrahimpour K, Esmaeili SV, Karimi A, Kamranifar M, Pour MN, et al. Chemical health risk assessment of exposure to metal fumes among employed workers in a metal manufactory with an electric arc furnace. *Int J Environ Health Eng*. 2024;13(1):18. doi: [10.4103/ijehe.ijehe_52_23](https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_52_23)
17. Macko M, Antoš J, Božek F, Konečný J, Huzlík J, Hegrová J, Kuřitka I. Development of New Health Risk Assessment of Nanoparticles: EPA Health Risk Assessment Revised. *Nanomaterials (Basel)*. 2022;13(1):20. doi: [10.3390/nano13010020](https://doi.org/10.3390/nano13010020)