

ОРИГІНАЛЬНІ СТАТТІ

УДК 613.632:669.04:616-099-092.9

<https://doi.org/10.33573/ujoh2025.01.003>

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТИНОК НАНОРОЗМІРНОГО ДІАПАЗОНУ В ПОВІТРІ РОБОЧОЇ ЗОНИ ПЛАВИЛЬНИКА МЕТАЛУ НА ОРГАНІЗМ ЩУРІВ ВІСТАР

Шаравара Л. П.¹, Дмитруха Н. М.², Андрусишина І. М.²¹Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, м. Запоріжжя²Державна установа «Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва Національної академії медичних наук України», м. Київ

Вступ. Під час високотермічних процесів плавлення та зварювання металів, механічної обробки твердих матеріалів утворюються зважені частинки ультрадисперсного розміру, які мають в своєму складі різні за розміром, масовою концентрацією, площею поверхні, хімічним складом зважені частинки нанорозмірного діапазону. Таким чином, плавильники та зварювальники металу піддаються впливу комбінованого промислового аерозолі різного за фізико-хімічними властивостями, що потребує детального вивчення його наслідків для їхнього здоров'я.

Мета дослідження – вивчення токсичності зважених частинок нанорозмірного діапазону, що присутні в повітрі робочої зони плавильника металу, на організм щурів Вістар.

Матеріали та методи дослідження. Проведено моделювання хронічної інтоксикації зваженими частинками нанорозмірного діапазону промислового аерозолі на щурах Вістар. Зважені частинки відбирали в деіонізовану воду на робочому місці плавильника металу за допомогою пробовідбірника ТАЙФУН Р-20-2. Фізичні властивості зважених частинок визначали за допомогою портативного скануючого спектрометра NanoScan SMPS 3910 (США), хімічний склад – методом атомно-емісійної спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою. Колоїдний розчин із зваженими частинками вводили внутрішньоочеревинно щурам самцям лінії Вістар 5 разів на тиждень протягом 6 тижнів. Патоморфологічні зміни у внутрішніх органах оцінювали через 6 тижнів від початку експерименту та через 6 тижнів після припинення експозиції за допомогою програми морфометрії Відеотест – Морфологія 5.2.0.158.ось із використанням мікроскопа Axio Scope A1 «Carl Zeiss» (Німеччина) з камерою Japortik Progres gyphax® серії SUBRA (Німеччина).

Результати. Виразені патоморфологічні зміни у внутрішніх органах тварин визначалися через 12 тижнів від початку експерименту. Найбільші зміни були характерні для легеневої тканини, які проявлялися наявністю ділянок емфіземи з потовщенням міжальвеолярних перегородок. У бронхіальному епітелії були присутні дистрофічні зміни, які проявлялися вакуолізацією клітин, визначалася запальна інфільтрація підслизового шару бронха. У міокарді спостерігалися вогнешеві зміни у вигляді деформації ядер кардіоміоцитів з їхньою вакуолізацією. Структура печінки характеризувалася вакуолізацією гепатоцитів зі збільшенням їхнього об'єму, цитоплазма яких була неоднорідною, сітчастою, великозернистою. У селезінці спостерігалася порушення співвідношення білої та червоної пульпи, у білій пульпі визначено зменшення кількості лімфоцитів. У червоній пульпі спостерігалася повнокров'я з наявними ділянками гемосидерозу. У нирках спостерігалися прогресуючі дегенеративні та склеротичні зміни. Порушення в головному мозку мали вигляд селективного руйнування окремих нейронів.

Висновки. Отримані результати показали виражені морфологічні зміни у структурі внутрішніх органів експериментальних тварин через 12 тижнів від початку експерименту, що свідчить про кумулятивний ефект від впливу зважених частинок промислового аерозолі. Патоморфологічні зміни були виявлені в усіх досліджуваних органах (легені, серце, мозок, печінка, селезінка, нирки), які характеризувалися дистрофічними, дисциркуляторними, запальними та склеротичними процесами, що згодом може призводити до розвитку не зворотних патологічних змін із порушенням їхніх функцій цих органів.

Ключові слова: токсичний вплив, зважені частинки нанорозмірного діапазону, плавлення металу, щури Вістар

Вступ

Сьогодні велика увага приділяється вивченню поведінки штучно синтезованих наночастинок металів в організмі, їхньому можливому негативному впливу на організм людини та дослідних тварин [1]. Нанорозмірні частинки металів можуть надходити в організм працівників окремих підприємств під час високотермічних процесів плавлення та зварювання металів, механічної обробки твердих матеріалів [2]. Особливі фізико-хімічні та токсичні властивості металів у вигляді наночастинок (НЧ) можуть створювати небезпеку, що потребує вивчення можливих наслідків їхнього впливу на організм працюючих.

Відомо, що НЧ виявляють різні властивості залежно від їхнього розміру та функціональності поверхні [3]. Ступінь токсичності НЧ може залежати від шляху потрапляння й їхнього системного розподілу в організмі. Інгаляційний шлях надходження може призвести до запальних реакцій, фіброзу та некрозу легеневої тканини [4, 5]. Потрапляючи через органи дихання вони легко транспортуються до системи кровообігу та можуть розподілятися й накопичуватися в різних органах і тканинах [6–8]. Розподіл та кумуляція НЧ в окремих органах певним чином залежить від їхніх фізико-хімічних властивостей [3].

Більшість проведених досліджень присвячена вивченню токсичності НЧ за умови короткочасного впливу, і в меншій кількості оцінці токсичних ефектів НЧ після тривалого хронічного впливу [9]. Тому вивчення особливостей хронічного впливу різних за фізико-хімічними властивостями НЧ металів на організм залишається актуальною проблемою профілактичної медицини.

Мета дослідження — вивчення токсичності зважених частинок (ЗЧ) нанорозмірного діапазону, що присутні в повітрі робочої зони плавильника металу, на організм щурів Вістар.

Матеріали та методи дослідження

ЗЧ промислового аерозолі, які утворюються під час плавлення металів, відбирали в повітрі робочої зони плавильного цеху на робочому місці плавильника металу машинобудівного підприємства в поглинач Зайцева, який містив 10 мл деіонізованої води, за допомогою пробовідбірника ТАЙФУН Р-20-2. Відбір проб повітря проводили протягом 6 тижнів в області дихання плавильника металу (6 проб). Отриманий колоїдний розчин із вмістом ЗЧ, для відокремлення часток у нанорозмірному

діапазоні (≤ 100 нм), фільтрували через шприц з приєднаним фільтротримачем із мембранним дисковим фільтром «Domnick Hunter» (Англія) діаметром 25 мм і розміром пор 100 нм. Хімічний склад визначали методом оптико-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ОЕС-ІЗП) за допомогою приладу «Optima 2100 DV» («PerkinElmer», США) та проводили аналіз за допомогою програмного забезпечення приладу ОЕС-ІЗП WinLab32 в операційній системі Windows XP prof.

Моделювання хронічної інтоксикації ЗЧ нанорозмірного діапазону проводили на статевозрілих щурах-самцях лінії Вістар, які були поділені на 2 групи: експериментальну та контрольну — по 6 тварин у кожній. Щурів отримано з розплідника ДУ «Інституту фармакології та токсикології НАМН України». Тварин утримували в умовах віварію на стандартному раціоні з вільним доступом до питної водогінної води в режимі природного освітлення «день і ніч» При роботі з лабораторними тваринами користувалися положеннями Європейської конвенції про захист хребетних тварин, які використовуються в експериментальних або інших наукових цілях (Страсбург, 1986 р.).

Отриманий відфільтрований колоїдний розчин вводили щурам експериментальної групи внутрішньоочеревинно щоденно (зранку 5 разів на тиждень — модель робочого тижня) у розрахунок 1 мл на 100 г маси тіла тварини (кількісна концентрація $142\ 358$ частинок/см³) протягом 6 тижнів. Тваринам контрольної групи вводили 1 мл на 100 г маси тіла тварин чистої деіонізованої води.

Морфологічні зміни структури внутрішніх органів (легені, міокард, головний мозок, печінка, селезінка, нирки) проводили через 6 тижнів від початку експерименту та через 6 тижнів після його припинення (на 12 тиждень від початку експерименту). Дослідних тварин виводили з експерименту шляхом декапітації під тіопенталовим наркозом (5 мг/1 мл фіз. розчину). Для гістологічного дослідження внутрішні органи фіксували 10 % розчином нейтрального формаліну протягом 24–48 год, зневоднювали і заливали в парафін. Серійні зрізи внутрішніх органів товщиною 5 мкм виготовляли на прецизійному ротаційному мікротомі НМ 3600 (фірми «MICROM Laborgeräte GmbH», Німеччина) з подальшим фарбуванням гематоксиліном і еозинном. Кількісні показники окремих структурних елементів внутрішніх органів проводилися за допомо-

гою програми морфометрії Відеотест – Морфологія 5.2.0.158.ось із використанням мікроскопа Axio Scope A1 «Carl Zeiss» (Німеччина) з камерою Jenoptik Progres gryphax® серії SUBRA (Німеччина).

Статистичну обробку отриманих результатів проводили за допомогою ліцензійного пакета Statistica® for Windows 13.0 (StatSoft Inc., ліцензія № JPY804I382130ARCN10-J). Статистичний аналіз результатів проводили з обчисленням медіани (Me), нижнього та верхнього кuartилей (Q1; Q3). Достовірність відмінностей порівнюваних величин визначали за критерієм Манна–Уїтні. Статистично значущою вважали різницю при $p \leq 0,05$.

Результати дослідження та їх обговорення

Встановлено, що до складу промислового ультрадисперсного аерозолі повітря робочої зони плавильника металу входили ЗЧ розміром від 10 нм до 400 нм з їхньою максимальною концентрацією від 27,4 нм до 48,7 нм. Дослідження хімічного складу ЗЧ промислового аерозолі наведено в таблиці. ЗЧ мали комбінований хімічний склад, до якого входили наступні елементи: манган, алюміній, кальцій, марганець, молібден, нікель, хром, ванадій, кремній, фосфор і сірка. Серед присутніх хімічних елементів найбільшу масову концентрацію мали манган (0,17–4,07 мкг/м³), кальцій (0,09–12,46 мкг/м³), кремній (1,99–3,22 мкг/м³), сірка (106,2–220,49 мкг/м³), найменшу – нікель, хром, молібден та алюміній. Безперечно, наявність хімічних елементів у нанорозмірному діапазоні викликає занепокоєння, особливо це стосується речовин, які відносяться до переліку доведених канцерогенів (хром, нікель) за класифікацією Міжнародної аген-

ції з дослідження раку (IACR). Такий комбінований склад ЗЧ у повітрі робочої зони плавильника металу зумовлений технологічним процесом, під час якого використовуються різні метали та домішки для створення відповідних сплавів.

Встановлено, що морфологічні зміни у внутрішніх органах експериментальних тварин на 6 тиждень експерименту після введення колоїдного розчину ЗЧ не мали статистичних відмінностей порівняно з контрольною групою. Через 12 тижнів від початку експерименту виявлялися значні морфологічні зміни в усіх досліджуваних органах. Найсуттєвіші зміни визначали в легенях. Відмічалася значна редукція капілярної мережі в респіраторній частині ацинусів. У легенях дослідної групи щурів поряд з ділянками емфіземи визначали потовщення міжальвеолярних перегородок за рахунок переважно лімфо-макрофагальної клітинної інфільтрації. У запальному інфільтраті також були поодинокі нейтрофіли (рис. 1).

У тварин експериментальної групи також визначали дистрофічні зміни бронхіального епітелію, які проявлялися вакуолізацією клітин, набуханням або пікнотичними змінами ядер, внаслідок чого епітеліальна вистілка набувала поліморфного вигляду. Визначали вогнищеву десквамацію бронхіального епітелію та запальну інфільтрацію підслизового шару бронха.

Через 12 тижнів у тварин експериментальної групи реєстрували патогістологічні зміни міокарда в поодиноких полях зору, які обмежувалися помірним нерівномірним забарвленням цитоплазми кардіоміоцитів, деформацією їхніх ядер з вакуолізацією або гіперхроматозом, відмічали каріопікноз і ділянки зникнення поперечної смугастості (рис. 2).

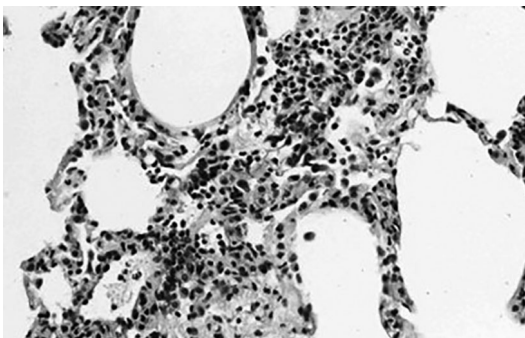


Рис. 1. Потовщення та запальна інфільтрація міжальвеолярних перегородок у легенях експериментальної групи тварин. Забарвлення Н&Е. Зб. $\times 200$

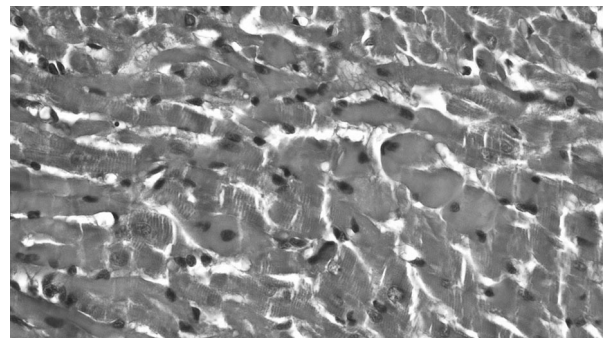


Рис. 2. Гістологічна будова міокарда тварин експериментальної групи через 12 тижнів експерименту. Забарвлення Н&Е. Зб. $\times 200$

Таблиця

Хімічний склад зважених частинок нанорозмірного діапазону в повітрі робочої зони плавильника металу, мкг/м³

Хімічний елемент	Проба 1		Проба 2		Проба 3		Проба 4		Проба 5		Проба 6	
	Концент- рація	Min Max	Концент- рація	Min Max	Концент- рація	Min Max	Концент- рація	Min Max	Концент- рація	Min Max	Концент- рація	Min Max
Магній	4,073	$\frac{3,95}{4,20}$	4,34	$\frac{4,30}{4,38}$	2,98	$\frac{2,89}{3,07}$	–	–	–	–	0,17	$\frac{0,16}{0,18}$
Алюміній	0,0022	$\frac{0,0020}{0,0024}$	0,001	$\frac{0,00097}{0,0012}$	0,0036	$\frac{0,0032}{0,0004}$	–	–	–	–	–	–
Кальцій	12,46	$\frac{12,09}{12,89}$	13,29	$\frac{12,89}{13,69}$	8,85	$\frac{8,81}{8,89}$	0,092	$\frac{0,090}{0,094}$	0,030	$\frac{0,027}{0,033}$	0,89	$\frac{0,87}{0,91}$
Манган	0,0003	$\frac{0,00029}{0,00031}$	0,0003	$\frac{0,00029}{0,00031}$	–	–	–	–	–	–	–	–
Нікель	–	–	–	–	0,0029	$\frac{0,0027}{0,0031}$	0,012	$\frac{0,0011}{0,0134}$	0,0027	$\frac{0,0024}{0,0030}$	–	–
Молибден	0,0031	$\frac{0,0030}{0,0032}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Хром	–	–	–	–	0,001	$\frac{0,00098}{0,0012}$	–	–	–	–	–	–
Фосфор	0,022	$\frac{0,020}{0,024}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Кремній	2,990	$\frac{2,90}{3,08}$	3,22	$\frac{3,20}{3,24}$	1,99	$\frac{1,93}{2,05}$	–	–	–	–	–	–
Ванадій	0,29	$\frac{0,28}{0,3}$	0,29	$\frac{0,27}{0,31}$	0,204	$\frac{0,020}{0,0208}$	0,14	$\frac{0,138}{0,142}$	0,19	$\frac{0,17}{0,21}$	0,115	$\frac{0,112}{0,118}$
Сірка	220,49	$\frac{213,88}{227,1}$	106,22	$\frac{103,03}{109,41}$	161,35	161,4	149,65	149,7	154,22	154,2	118,46	118,5

У тварин експериментальної групи визначали деструктивні зміни в печінці. Спостерігали вакуолізацію гепатоцитів: їхній об'єм збільшувався, цитоплазма ставала оптично прозорою, відмічалася повнокров'я синусоїдів на тлі зменшення їхніх просвітів (рис. 3). Повнокровність і стаз крові в окремих судинах мікроциркуляторного русла свідчив про порушення реологічних властивостей крові. В окремих ділянках навпаки реєстрували суттєве розширення синусоїдів при збереженні помірної вакуолізації гепатоцитів. У цитоплазмі гепатоцитів з'являлася різного ступеня виразності зернистість, що може вказувати на прояв початкових стадій білкової дистрофії, або посилене функціонування гепатоцитів в умовах несприятливого впливу ЗЧ різного хімічного складу.

Площа ядер гепатоцитів в експериментальній групі становила $40,63 \text{ мкм}^2$ (39,94; 43,55), яка є більшою порівняно з контрольними спостереженнями в 1,07 разу, що мало статистично значимі відмінності порівняно з контролем ($p \leq 0,01$).

Через 12 тижнів в експериментальній групі відзначали морфологічні зміни в селезінці, а саме: зменшення площі періартеріальних Т-залежних зон, зменшення загальної клітинності білої пульпи, яке відбувалося за рахунок лімфоцитів як переважаючої клітинної популяції, що призвело до зменшення співвідношення білої та червоної пульпи. Треба зауважити, що вплив ЗЧ на селезінку призводить до загибелі лімфоцитів і зменшення їхньої кількості в білій пульпі. У червоній пульпі збільшувалося повнокров'я. Поміж повнокровних судин, поряд з малими лімфоцитами, які становили переважну більшість клітинної популяції, з'являлася велика кількість молодих і бластних форм клітин лімфоїдного ряду, збільшувалася кількість ретику-

лярних клітин, які надавали стромі селезінки сітчастий малюнок (рис. 4).

У розширених лімфатичних колекторах червоної пульпи були наявні ділянки гемосидерозу, поряд з якими зростала кількість одноядерних макрофагів, що може свідчити про посилений гемоліз еритроцитів у синусах червоної пульпи, як наслідки негативної дії ЗЧ.

На 12 тиждів більшість клубочків нирки в експериментальній групі тварин зберігало нормальну гістологічну будову. В окремих клубочках збільшувалася кількість мезангіальних клітин, які пропорційно були розподілені по всій площі та не формували скупчень. Канальцевий апарат нирок у дослідних щурів також зазнавав змін порівняно з контрольними спостереженнями, де визначали поступові прогресуючі дегенеративні та склеротичні зміни. У тварин експериментальної групи в 1/3 спостережень діагностували розширення капілярного клубочка за рахунок збільшення клітин у мезангіальному матриксі, що суттєво зменшувало сечовий простір.

У головному мозку експериментальних тварин морфологічні зміни добре виявлялися через 12 тижнів від початку експерименту. Відзначали селективне руйнування окремих нейронів, які виглядали пікнотичними і мали виражене забарвлення в інтенсивно синій колір. В окремих дрібних капілярах визначали стаз крові. Паренхіма мозку залишалася компактною, без набрякових змін. Найдемонстративніші зміни відбувалися в зонах з упорядкованою цитоархітектонікою. У гіпокампі експериментальної групи 8–10 % нейронів були пікнотично змінені з більш вираженим навколишнім перичелюлярним набряком.

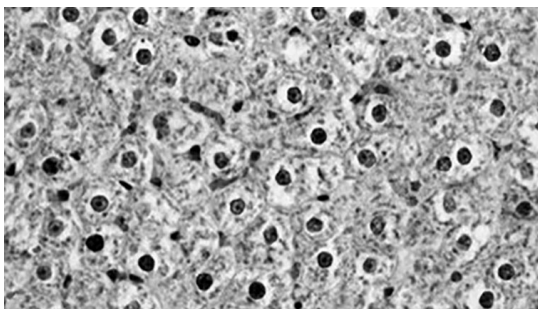


Рис. 3. Збільшення в обсязі гепатоцитів з вакуолізацією цитоплазми, повнокров'я синусоїдів у тварин експериментальної групи спостереження. Забарвлення Н&Е. Зб. $\times 400$

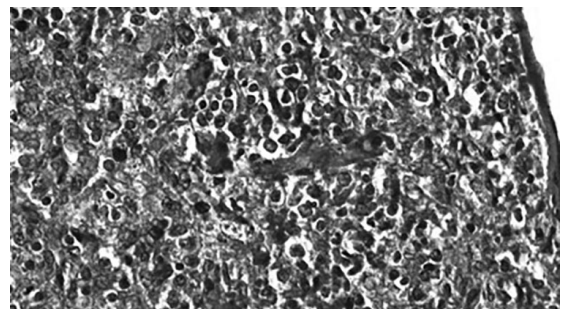


Рис. 4. Поліморфний клітинний склад на фоні повнокров'я судин і синусів червоної пульпи селезінки. Забарвлення Н&Е. Зб. $\times 200$

Висновки

1. Особливістю хімічного складу ЗЧ нанорозмірного діапазону повітря робочої зони плавильника є його комбінований склад, серед яких присутні хімічні речовини, що відносяться до списку доведених канцерогенів згідно з класифікацією Міжнародної агенції з дослідження раку (IACR). Наявність таких хімічних речовин у нанорозмірному діапазоні сприяє їхньому більш швидкому і легкому надходженню в різні органи та системи організму, що підвищує ризик негативного наслідку для організму працюючих.
2. Проведені морфологічні дослідження внутрішніх органів експериментальних тварин свідчать про те, що виражені зміни спостерігалися через

12 тижнів після початку експерименту. Патоморфологічні зміни були виявлені в усіх досліджуваних внутрішніх органах (легені, серце, мозок, печінка, селезінка, нирки), що характеризувалися дистрофічними, дисциркуляторними, запальними та склеротичними процесами в цих тканинах, які згодом можуть призвести до розвитку незворотних патологічних змін із порушенням їхньої функції.

3. Отримані результати щодо негативної дії зважених НЧ, які виділені з повітря робочої зони плавильників металу, на організм щурів Вістар підтверджують актуальність подальшого вивчення їхнього потенційного впливу на працюючих і визначення пріоритетних заходів профілактики.

Література

1. Najahi-Missaoui W., Arnold R. D., Cummings B. S. Safe Nanoparticles: Are We There Yet? *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22 (1). 385. <https://doi.org/10.3390/ijms22010385>.
2. Sharavara L. P., Dmytrukha N. M., Andrusyshyna I. M. Ultrafine industrial aerosol as a risk factor for the health of smelting shop workers at a machine-building enterprise. *Zaporozhye medical journal*. 2024. Vol. 26, No. 1. P. 44–52. <https://doi.org/10.14739/2310-1210.2024.1.290499>.
3. Mohd Ali. What function of nanoparticles is the primary factor for their hyper-toxicity? *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023. Vol. 314. P. 102881. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102881>.
4. Titanium dioxide nanoparticles: A review of current toxicological data. H. Shi, R. Magaye, V. Castranova, J. Zhao. *Part Fibre Toxicol*. 2013. Vol. 10. P. 15. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-15>.
5. Inoue K., Takano H. Aggravating impact of nanoparticles on immune-mediated pulmonary inflammation. *Sci. World J*. 2011. Vol. 11. P. 382–390. <https://doi.org/10.1100/tsw.2011.44>.
6. Leikauf G. D., Kim S. H., Jang A. S. Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects. *Experimental & molecular medicine*. 2020. Vol. 52 (3). P. 329–337. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0394-0>.
7. Токсикологічні та морфологічні аспекти прояву гострої дії нано-TiO₂ і нано-TiO₂-Ag на печінку лабораторних мишей. О. П. Яворовський, С. І. Савосько, В. М. Рябовол, Т. О. Зінченко. *Патологія*. 2023. Т. 20, № 2 (58). С. 162–169. <https://doi.org/10.14739/2310-1237.2023.2.277852>.
8. Microglial Activation and Oxidative Stress in PM2.5-Induced Neurodegenerative Disorders. J. Song, K. Han, Y. Wang et al. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*. 2022. Vol. 11 (8). P. 1482. <https://doi.org/10.3390/antiox11081482>.
9. Wu T., Tang M. Review of the effects of manufactured nanoparticles on mammalian target organs. *J. Appl. Toxicol*. 2018. Vol. 38, No. 1. P. 25–40. <https://doi.org/10.1002/jat.3499>.

Sharavara L. P.¹, Dmytrukha N. M.², Andrusyshyna I. M.²

STUDY OF THE TOXIC IMPACT OF SUSPENDED PARTICLES IN THE NANOSCALE RANGE IN THE AIR OF THE WORKING AREA OF A METAL SMELTER ON THE ORGANISM OF WISTAR RATS

¹Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine

²State Institution «Kundiiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

Introduction. During high-temperature processes of melting and welding of metals, mechanical processing of solid materials, suspended particles of ultra-disperse size are formed, which contain suspended particles of nano-sized range, which differ in size, mass concentration, surface area, and chemical composition. Thus, workers working in these conditions are exposed to a combined industrial aerosol of different physico-chemical properties, which requires a detailed study of the negative consequences for the body of workers.

The aim of the research – to investigate the toxic effect of suspended particles in the nanoscale range of air in the working area of a metal smelter on the body of Wistar rats.

Materials and methods of the research. A simulation of chronic intoxication with suspended particles of the nanoscale range of industrial aerosol was carried out on Wistar rats. Suspended particles were collected in deionized water at the workplace of a metal smelter using a TYPHOON R-20-2 sampler. The physical properties of the suspended particles were determined using a portable scanning spectrometer NanoScan SMPS 3910 (USA), the chemical composition was determined using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The colloidal solution with suspended particles was administered intraperitoneally to male Wistar rats 5 times a week for 6 weeks. Pathomorphological changes in internal organs were assessed 6 weeks after the start of the experiment and 6 weeks after the end of exposure using the morphometry program Videotest – Morphology 5.2.0.158.os using an Axio Scope A1 microscope "Carl Zeiss" (Germany) with a Jenoptik Progress gryphax® SUBRA series camera (Germany).

Results. Pronounced pathomorphological changes in the internal organs of animals were determined 12 weeks after the start of the experiment. The greatest changes were characteristic of the lung tissue, which were manifested by the presence of areas of emphysema with thickening of the interalveolar septa. Dystrophic changes were present in the bronchial epithelium, which were manifested by vacuolization of cells, and inflammatory infiltration of the submucosal layer of the bronchus was determined. In the myocardium, inflammatory changes were observed in the form of deformation of cardiomyocyte nuclei with their vacuolization. The structure of the liver was characterized by vacuolization of hepatocytes with an increase in their volume, the cytoplasm of which was heterogeneous, reticular, and large-grained. In the spleen, a violation of the ratio of white and red pulp was observed, a decrease in the number of lymphocytes was determined in the white pulp. In the red pulp, pleurisy was observed with areas of hemosiderosis. Progressive degenerative and sclerotic changes were observed in the kidneys. Changes in the brain took the form of selective destruction of individual neurons.

Conclusions. The results obtained showed pronounced morphological changes in the structure of the internal organs of experimental animals 12 weeks after the start of the experiment, which indicates a cumulative effect of exposure to suspended particles. Pathomorphological changes were detected in all studied organs (lungs, heart, brain, liver, spleen, kidneys), which were characterized by dystrophic, dyscirculatory, inflammatory and sclerotic processes in these tissues, which in the future can lead to the development of irreversible pathological changes with impaired function.

Key words: toxic effects, suspended particles in the nanoscale range, metal melting, Wistar rats

References

1. Najahi-Missaoui W, Arnold RD, Cummings BS. Safe Nanoparticles: Are We There Yet? International Journal of Molecular Sciences. 2021;22(1):385. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22010385>.
2. Sharavara LP, Dmytrukha NM, Andrusyshyna IM. Ultrafine industrial aerosol as a risk factor for the health of smelting shop workers at a machine-building enterprise. Zaporozhye medical journal. 2024; 26(1):44-52. DOI: <https://doi.org/10.14739/2310-1210.2024.1.290499>.
3. Mohd Ali. What function of nanoparticles is the primary factor for their hyper-toxicity? Advances in Colloid and Interface Science. 2023;314:102881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102881>.
4. Shi H, Magaye R, Castranova V, et al. Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data. Part Fibre Toxicol. 2013;10:15. DOI: <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-15>.
5. Inoue K, Takano H. Aggravating impact of nanoparticles on immune-mediated pulmonary inflammation. Sci. World J. 2011;11:382-90. DOI: <https://doi.org/10.1100/tsw.2011.44>.
6. Leikauf GD, Kim SH, Jang AS. Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects. Experimental & molecular medicine. 2020;52(3):329-37. DOI: <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0394-0>.
7. Yavorovskiy OP, Savosko SI, Ryabovol VM, Zinchenko TO. [Toxicological and morphological aspects of the manifestation of the acute effect of nano-TiO₂ and nano-TiO₂-Ag on the disease of laboratory mice]. Pathology. 2023;20(2):162-9. DOI: <https://doi.org/10.14739/2310-1237.2023.2.277852>. Ukrainian.
8. Song J, Han K, Wang Y, Qu R, Liu Y, Wang S, Wang Y, An Z, Li J, Wu H, Wu W. Microglial Activation and Oxidative Stress in PM2.5-Induced Neurodegenerative Disorders. Antioxidants (Basel, Switzerland). 2022;11(8):1482. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11081482>.
9. Wu T, Tang M. Review of the effects of manufactured nanoparticles on mammalian target organs. J. Appl. Toxicol. 2018;38(1):25-40. DOI: <https://doi.org/10.1002/jat.3499>.

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

Шаравара Л. П. (ORCID ID 0000-0001-9102-3686) – збір матеріалів, первинний аналіз даних, написання тексту статті, формулювання висновків;

Дмитруха Н. М. (ORCID ID 0000-0001-9161-3889) — постановка мети дослідження, редагування тексту статті, формулювання висновків;

Андрусишина І. М. (ORCID ID 0000-0001-5827-3384) — виконання аналітичних досліджень, математична обробка отриманих результатів та їхній аналіз, редагування тексту статті, формулювання висновків.

Інформація щодо джерел фінансування дослідження: дослідження виконано за темою «Сучасні фактори ризику та їх профілактика в системі громадського здоров'я», номер державної реєстрації 0123U100215.

Надійшла: 03 лютого 2025 р.

Прийнята до друку: 14 березня 2025 р.

Контактна особа: Шаравара Лариса Павлівна, кандидат медичних наук, доцент, кафедра загальної гігієни, медичної екології та профілактичної медицини, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, буд. 26, бульв. Марії Примаченко, м. Запоріжжя, 69035, Україна. Тел.: +38 0 99 271 77 57.

Електронна пошта: saravaralarisa@gmail.com