

УДК 621.10.56

**Olga Chenchewa**, PhD, Associated professor  
ORCID ID: 0000-0002-5691-7884 *e-mail*: chenchevaolga@gmail.com

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

## **ANALYSIS OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF THE DUST OF THE WORKING AREA WHEN DRILLING COMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON FIBERS**

***Abstract.** Modern production of unmanned aerial vehicles is characterized by the use of high-tech materials based on carbon fibers, the assembly operations of which are characterized by a large number of mechanical drilling operations, which are performed mainly by hand using a carbide tool with a diamond coating. The paper presents a study of the concentrations and dispersion of the dust composition and the geometric shape of the dust-forming particles in the working space of workers of machining shops during the technological operations of drilling, milling and countersinking of packages of composite materials based on carbon polyacrylonitrile fibers. On the basis of the conducted experiments, the regularities of the distribution of dust of different fractions in the horizontal and vertical planes of the working space at a distance covering the zone of the immediate location of the worker during this type of operation were determined. The obtained data made it possible to record a significant excess of the maximum allowable concentrations of finely dispersed residues of polyacrylonitrile fibers in the working area of the drill, 2.5 and 10  $\mu\text{m}$  in size and elements of the carbon matrix. In order to investigate the possibility of a negative impact of the dust of the working area on the body of the worker, a study of the fractionation and geometric shape of carbon fiber fragments was performed using raster microscopy, based on which it was concluded that the fiber fragments have a spear-shaped, pointed shape, and the carbon matrix forms conglomerates, which are characterized sharp edges and can cause significant damage when they affect the human respiratory system. On the basis of the obtained results, recommendations were given in the work to improve the indicators of the dust load of workers to normalized values with the help of the use of special suction devices and personal protective equipment with special filters.*

***Key words:** dust fraction; dust load; working area; dispersed composition; mechanical processing; occupational health.*

### **О.О. Ченчева**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
м. Кременчук, Україна

## **АНАЛІЗ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ПИЛУ РОБОЧОЇ ЗОНИ ПРИ СВЕРДЛУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КАРБОНОВИХ ВОЛОКОН**

***Анотація.** Сучасне виробництво безпілотних літальних апаратів характеризується використанням високотехнологічних матеріалів на основі карбонових волокон, збиральні операції яких характеризуються великою кількістю механічних операцій свердлування, які виконуються переважно вручну із використанням твердосплавного інструмента з алмазним покриттям. В роботі представлено дослідження концентрацій та*

дисперсності пилового складу та геометричної форми пилоутворюючих частинок у робочому просторі працівників механообробних цехів при виконанні технологічних операцій свердлування, фрезерування та зенкерування пакетів композиційних матеріалів на основі карбонових поліакрилонітрильних волокон. На основі проведених експериментів було визначено закономірності розповсюдження пилу різної фракції у горизонтальних та вертикальних площинах робочого простору на відстані, що охоплює зону безпосереднього розташування робітника під час виконання такого типу операцій. Отримані дані дозволили зафіксувати значне перевищення гранично допустимих концентрацій дрібнодисперсних залишків поліакрилонітрильних волокон у робочій зоні свердлувальника, розміром 2,5 та 10 мкм, та елементів карбонової матриці. З метою дослідження можливості негативного впливу пилу робочої зони на організм працівника було виконано дослідження фракційності та геометричної форми уламків карбонових волокон за допомогою растрової мікроскопії, на основі чого було зроблено висновок, що уламки волокон мають списовидну гостроконечну форму, а карбонова матриця утворює конгломерати, які характеризуються гострими гранями і здатні завдавати значної шкоди при їх впливі на дихальну систему людини. На основі отриманих результатів в роботі було надано рекомендації щодо покращення показників пилового навантаження працівників до унормованих значень за допомогою використання спеціальних відсмоктувальних пристроїв та засобів індивідуального захисту зі спеціальними фільтрами.

**Ключові слова:** фракція пилу; пилонавантаження; робоча зона; дисперсний склад; механічна обробка.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.100-108>

## Вступ

Сучасна безпекова ситуація в Україні стала причиною розвитку виробництва сучасних легких літальних апаратів, основою конструкцій яких є сучасні високотехнологічні, надміцні композиційні матеріали на основі карбонових волокон.

Збір елементів літальних апаратів (ЛА) і з'єднання окремих шарів конструкційних матеріалів виконують за допомогою з'єднань, від точності виконання яких залежить якість і довговічність конструкції в цілому. Саме тому прецензійність виконання отворів для такого типу конструкцій є найважливішою характеристикою якості обробки елементів. В реальному збиральному процесі виробництва ЛА основними технологічними процесами, які здатні забезпечити вимоги до якості обробки та чистоти робочого місця, є обробка осьовим інструментом та спіральне фрезерування.

У випадках виконання отворів у дрібних деталях та елементах складної геометричної форми, а також у важкодоступних місцях використовують портативний ручний інструмент з можливістю регулювання подачі в залежності від типу карбонвмісного матеріалу, діаметра свердла, а також з можливістю реалізації автоматичного підводу і виводу свердла із зони різання та контролем глибини свердління та перевантаження інструмента.

## Стан питання

Виконання отворів у пакетах композиційних матеріалів на основі карбонових волокон характеризується значним виділенням дрібнодисперсного пилу і

шламу із зони різання, що особливо проявляється при обробці матеріалів на основі пірвуглецевої матриці, що свідчить про загрозу здоров'ю працюючих, оскільки дія пилу на організм носить накопичувальний характер.

Нормування та оцінка впливу на здоров'я працюючих дрібнодисперсних твердих частинок, присутніх у повітрі робочої зони механообробних цехів, залишається актуальною проблемою, оскільки пиловий фактор характерний для багатьох виробництв [1]. Цілим рядом досліджень встановлено, що особливу небезпеку становлять респірабельні (діаметром до 5 мкм) та трахеобронхіальні (діаметром від 5 до 10 мкм) дрібнодисперсні часточки [2]. При цьому гігієнічні нормативи на зважені частки розмірами менше 10 мкм (PM10) та 2,5 мкм (PM2,5) у повітрі робочої зони мають бути унормовані та відповідати державним та міжнародним стандартам. Визначення параметрів розподілу концентрацій є важливим для оцінки та дослідження пневмоконіознебезпечності робочих місць. Дуже важкою проблемою пилового моніторингу є визначення дисперсного складу частинок, що витають у повітрі та вдихаються людиною.

Вкрай недостатніми є фрагментарні дані про частку дрібних фракцій у загальній масі пилових частинок у повітрі робочої зони. Важливою при аналізі впливу карбонового пилу є інформація про форму частинок, оскільки дрібні часточки карбонових волокон з гострими гранями, особливо голчастої форми (кристалічний пил, нанотрубки, порошинки карбонового волокна і т. п.), надають більшу подразнювальну дію в місці зіткнення (на слизових оболонках очей, верхніх дихальних шляхів, а іноді і на шкірному покриві), тоді як аморфний і волокнистий пил меншою мірою викликає місцеве подразнення тощо [3].

**Мета роботи** – дослідження дисперсного складу пилу механообробних цехів виробництв ЛА, визначення геометричної форми пилового шламу та оцінка коректності класифікації пилу як характеристик робочих місць робітників.

### **Виклад основного матеріалу**

Оброблюванню твердосплавним свердлом піддавали високоміцний термостійкий композиційний матеріал на основі поліакрилонітрильних карбонових волокон 3D укладання, просочених пірвуглецевою матрицею, на основі високотемпературного спікання. Структура карбон-карбонового композиту наведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура карбонвмісного композиційного матеріалу на основі поліакрилонітрильних волокон

Дослідження дисперсного складу та геометричної форми пилових викидів виконувались на прикладі виконання отворів у карбон-карбонівому композиті твердосплавним свердлом діаметром  $d = 8 \text{ mm}$  за допомогою ручного інструмента з постійною подачею [4].

Пробовідбір пилу здійснювався на робочих місцях у безпосередній близькості до джерел виділення (від 10 до 50 см від місця пилоутворення). При відборі застосовувалися пристрої, що дозволяють досліджувати фракційний склад пилу. Тривалість відбору проб становила від 2 до 10 хв (залежно від інтенсивності виділення пилу на джерелі виділення) зі швидкістю  $20 \text{ dm}^3/\text{хв}$ .

Вимірювання глибини свердлування було виконано за допомогою нутроміра PROTETER 5336-160.

Визначення дисперсного складу пилових викидів здійснювали із застосуванням SDS011 сенсорів пилу PM2.5 та PM10 (охоплюваний діапазон розміру частинок від 2,5 мкм до 10 мкм), які було розташовано у вертикальній і горизонтальній площинах робочого місця, на відстані від 10 до 50 см від місця врзання свердла в оброблюваний композит. На підставі результатів, отриманих при визначенні дисперсного складу, визначалася концентрація дрібнодисперсних карбонівих частинок у повітрі PM2.5 і PM10.

Для мікроскопічного аналізу пилу з метою встановлення геометричної форми частинок використано растровий електронний мікроскоп PEM-3-I на базі Науково-дослідного центру обробки матеріалів потужними енергетичними потоками Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

При характеристиці робочих місць свердлувальників та фрезерувальників урахування значної частки дрібнодисперсного пилу є обов'язковим, особливо при здійсненні обробки композиційних матеріалів на основі поліакрилонітрильних карбонівих волокон [5].

Для конкретного виду виробничого пилу при обробці карбонвмісних композиційних матеріалів отримали гістограми, що дозволяють оцінити весь спектр частинок різного розміру та їх концентрації на різних відстанях від джерела виконання отворів та глибини заглиблення інструмента у матеріал (рис. 2).

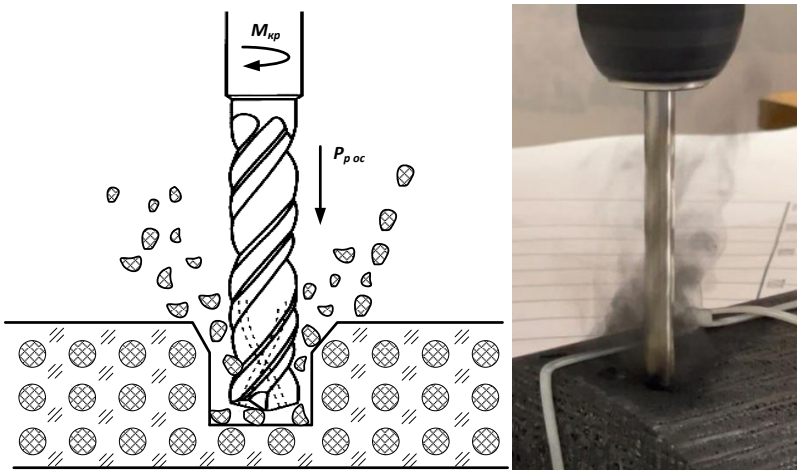


Рис. 2. Схема пилоутворення при свердлуванні карбон-карбонівому композиту марки на основі поліакрилонітрильних волокон

Величина фракції пилу, який вдихається свердлувальником, залежить від швидкості та напрямку руху повітря, від частоти дихання та інших факторів. Визнається, що при відборі проби вдихається фракція тільки тих частинок, що містяться в повітрі та знаходяться в зоні дихання. Саме тому дослідження концентрації пилу у робочій зоні здійснювалося на відстані від 10 до 50 см від місця виконання отвору як по горизонтальній поверхні розповсюдження, так і по вертикальній. Такий підхід дозволяє отримати узагальнений показник пилового навантаження, який здатен враховувати турбулентність пилових мас при їх виведенні із зони різання у канавках свердла та при виконанні свердлування за допомогою дискретної циклічної подачі інструмента, що пришвидшує процес руйнування матеріалу та швидкості його обробки.

Розподіл концентрацій пилу наведено на діаграмах (рис. 3–5).

Початковий пиловий фон до обробки становив 11–12 мг/м<sup>3</sup>.

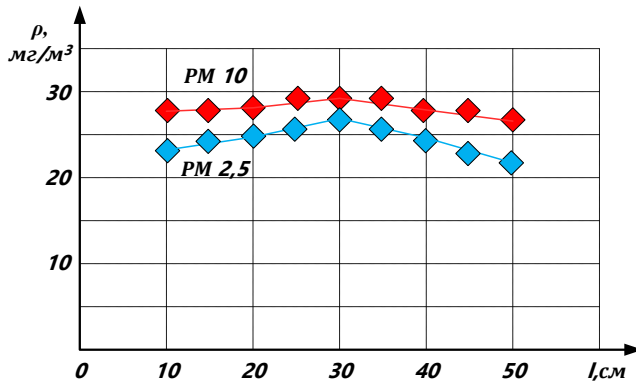


Рис. 3. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі горизонтальної площини від відстані до врізання у матеріал

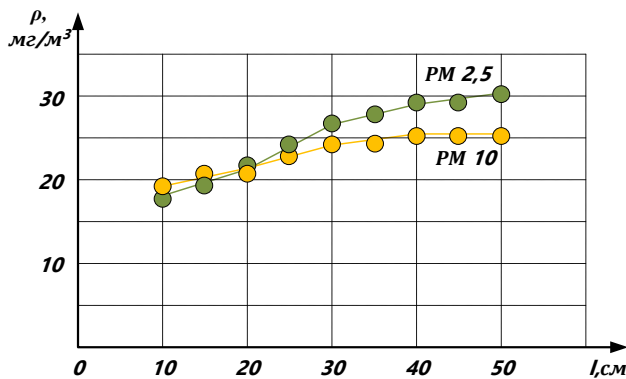


Рис. 4. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі вертикальної площини від відстані до врізання у матеріал

З представлених графіків очевидно, що дисперсний склад пилу досить різномірний. При виконанні технологічних операцій механічної обробки конструкційних отворів у пакетах карбонвмісних композиційних матеріалів, пов'язаних зі шліфуванням, свердлінням, зенкеруванням, розточуванням

отворів, нарізуванням різьблення, обточуванням торців і циліндричних поверхонь та ін., спостерігається виділення у повітря робочої зони значної кількості дрібнодисперсного пилу (P) від 50 до 70% загальної маси твердих частинок.

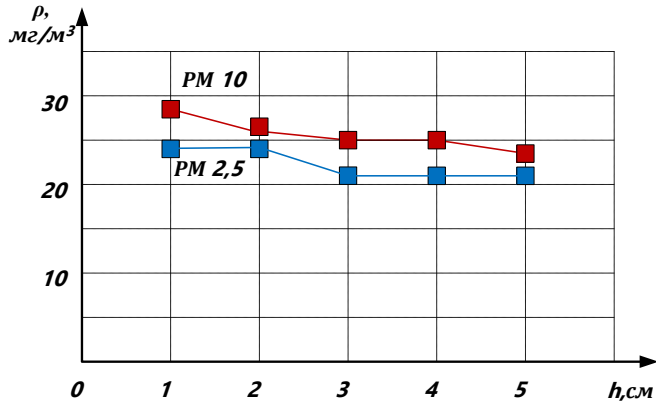


Рис. 5. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі від глибини різання в матеріал

Для цих же технологічних операцій характерна і наявність у загальній масі частинок найтоншого пилу (PM2,5; PM10), який може довго знаходитися в повітрі, поширюючись з конвективними потоками повітря по всій робочій зоні. Частка частинок пилу з діаметром менше 2,5 мкм під час проведення робітниками операцій з механічної обробки карбонових деталей становить у середньому 16–17%.

Як видно з наведених гістограм, рівень підвищення пилового навантаження при обробці карбонового композиту зріс вдвічі в радіусі робочої зони свердловальника. При цьому більшість продуктів свердління, які виносяться із зони різання у жолобі твердосплавного свердла та розповсюджуються у повітряному просторі робочої зони під дією відцентрових сил при його обертанні, містять залишки пірвуглецевої матриці та залишки поліакрилонітрильних волокон, що підтверджують результати растрової мікроскопії пилу. Згідно з [6], ГДК таких елементів у повітрі не має перевищувати 2–4 мг/м<sup>3</sup>. Отримані результати дозволяють стверджувати про значне перевищення гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони при свердлуванні карбон-карбонових композитів.

З метою дослідження форми, складу та розмірів частинок осадженого пилу, який виділяється при обробці карбонових композиційних матеріалів, за допомогою растрового мікроскопу на струмопровідну підложку було нанесено шар осадженого пилу. Слід зазначити, що при мікроскопуванні пилу в результаті механічної обробки карбон-карбонових композитів твердосплавним свердлом були ідентифіковані пилові частинки діаметром менше 0,01 мкм (менше 100 нм), тобто частки нанорозмірного діапазону. Окрім викришування пірвуглецевої матриці, при виконанні свердловальних операцій в складі осадженого пилу були виявлені залишки вуглецевих волокон та навіть агломерати вуглецевих пучків, які мають списоподібну геометричну форму до 70% від загального складу пилу. Гігієнічні наслідки впливу таких

частинок вивчені слабо, що потребує детальної уваги до якості повітря робочої зони під час операцій механічної обробки та виконання отворів при зборі літальних апаратів на основі карбонвмісних композиційних матеріалів.

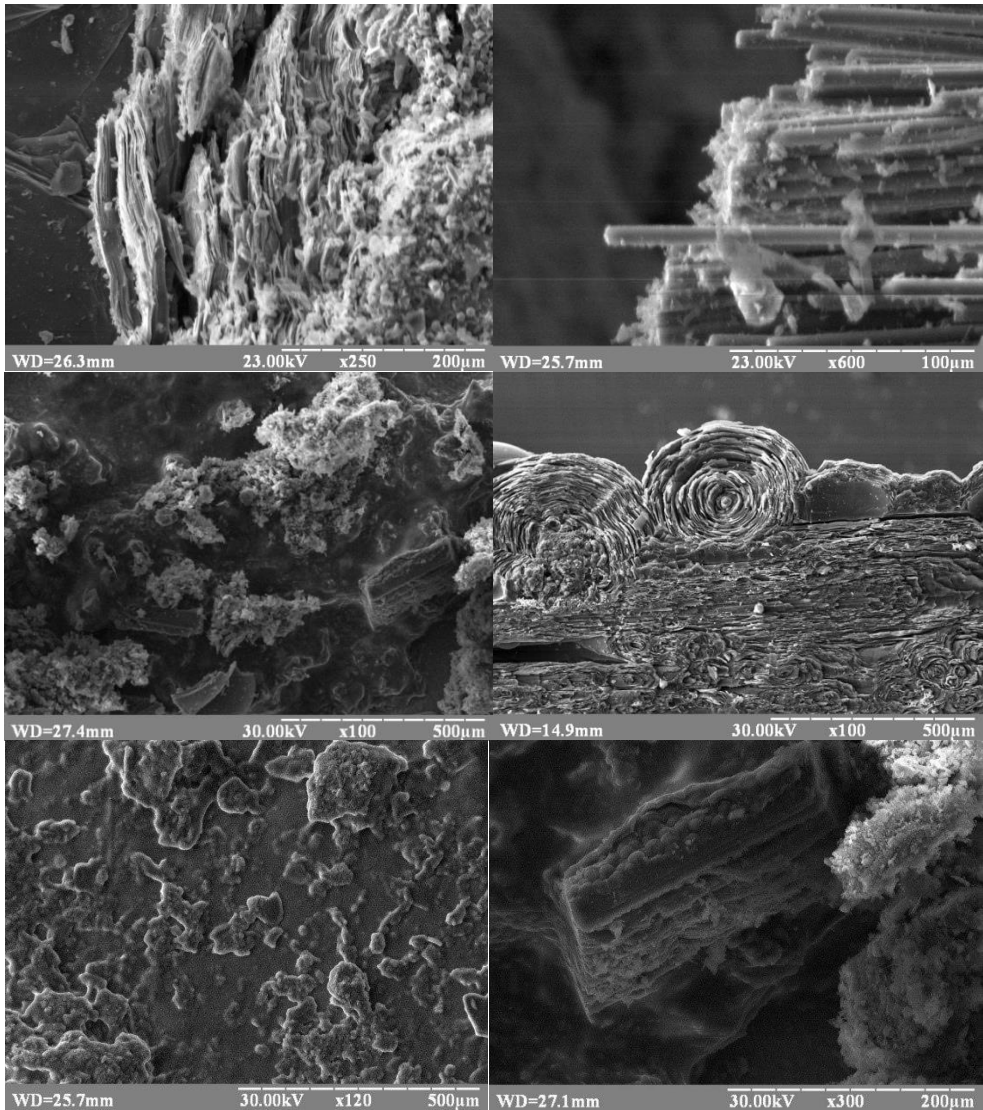


Рис. 5. Мікрофотографії осадженого пилу в результаті обробки карбонвмісних матеріалів, отримані за допомогою РЕМ-30-І

Під час аналізу пилу після обробки отворів алмазним інструментом було встановлено, що у складі пилових частинок, крім матеріалів карбонвмісних композитів (залишки поліакрилонітрильних волокон та пірвуглецевої матриці), містяться сполуки заліза, кремнію, хрому, молібдену та залишків корунду, що вимагають подальшого детального аналізу персональної експозиції працюючих з важкими металами, що містяться в пилових частках.

В цілому отримані дані свідчать про необхідність детального контролю за пиловим складом робочої зони працівників механооброблювальних цехів, які

виконують безпосередню високоточну обробку отворів у пакетах композиційних матеріалів на основі карбонових волокон та пірвуглецевої матриці, використання засобів індивідуального захисту органів зору і дихання з фільтрами, які здатні затримувати карбоновий пи́л розмірами до 2,5 мкм, та використання мобільних засобів автоматичного видалення пи́лу з робочої зони обробки.

## **Висновки**

1. Фракційний та компонентний склад пилового забруднення робочої зони при механічній обробці карбонових композитів часто не відповідає класифікації, що використовується при характеристиці робочих місць.

2. Пилове забруднення повітря робочої зони свердлувальників композиційних матеріалів на основі карбонових волокон характеризується значною часткою дрібнодисперсних частинок, які значно перевищують допустимий регламент ГДК таких речовин у повітряному просторі робочої зони, що свідчить про загрозу для здоров'я працюючих.

3. Для деяких технологічних процесів встановлено присутність у пи́лу, що потрапляє у робочу зону, наночастинок, гігієнічна характеристика яких вивчена слабо.

4. Отримані дані підтверджують актуальність встановлення дисперсного та компонентного складу пилового забруднення повітря робочих місць для коректної оцінки персональної експозиції працюючих та гігієнічної характеристики умов праці.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Н.К. Пятниця-Горпиненко. Сучасний стан проблеми оцінки якості повітря робочої зони, *Environment and Health*, №2, 2015, С. 24–26.
2. Wahyu Susihono, I Putu Gede Adiatmikab, Assessment of inhaled dust by workers and suspended dust for pollution control change and ergonomic intervention in metal casting industry: A cross-sectional study, *Heliyon*. 2020 May; 6(5), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04067>
3. V. Azarov, M. Trokhimchyk, O. Sidelnikova, Research of Dust Content in the Earthworks Working Area, *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2008–2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
4. Ченчева, О. О., Бурдейна, Н. Б., Лашко, Є. Є., Шевченко, В. Г., Петренко І. С. (2022). Вплив пилоутворення при механічному обробленні карбон-карбонових композитів на ризик виникнення професійних захворювань. *Проблеми охорони праці в Україні*, 38(3–4), 25–33.
5. Salenko, A., Chencheva, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimenko, S., & Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (105)), 38–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>
6. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

*Стаття надійшла до редакції 06.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2023*



## REFERENCES

1. Pyatnytsia-Gorpynenko, N. (2015). The current state of the problem of air quality assessment of the working area. *Environment and Health*, 2, 24-26 [in Ukrainian].
2. Wahyu Susihono, I Putu Gede Adiatmikab. (2020). Assessment of inhaled dust by workers and suspended dust for pollution control change and ergonomic intervention in metal casting industry: A cross-sectional study. *Heliyon*. 2020 May; 6(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04067>
3. Azarov, V., Trokhimchyk, M., & Sidelnikova, O. (2016). Research of Dust Content in the Earthworks Working Area. *Procedia Engineering*, 150, 2008-2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
4. Chenchewa, O., Burdeyna, N., Lashko, E., Shevchenko, V., & Petrenko, I. (2022). The impact of dust formation during mechanical processing of carbon-carbon composites on the risk of occupational diseases. *Problems of labor protection in Ukraine*, 38(3-4), 25-33 [in Ukrainian].
5. Salenko, A., Chenchewa, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimentenko, S., & Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (105)), 38-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>
6. Order of the Ministry of health of Ukraine dated July 14, 2020 No. 1596 "On the approval of hygienic regulations for the permissible content of chemical and biological substances in the air of the working area."

*The article was received 06.02.2023 and was accepted after revision 17.05.2023*

### **Ченчева Ольга Олександрівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Адреса робоча:** вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

**ORCID ID:** 0000-0002-5691-7884 **e-mail:** chenchevaolga@gmail.com