

О. О. Ченчева

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОСАДЖЕННЯ ПИЛУ КАРБОНОВИХ КОМПОЗИТІВ ПРИ ШТУЧНІЙ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ

**Анотація.** **Мета.** Математичне моделювання взаємодії аероіонів з різнофракційними пиловими частинками волокнистих карбонівих композитів невизначеної геометричної, які мають у складі як елементи матриці, так і злами карбонівих волокон. **Методика.** Моделювання здійснювалося шляхом виведення нових прогнозованих залежностей взаємодії аероіонів з елементами пилу, які ґрунтуються на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики та масопереносу з урахуванням особливостей пилового та фракційного складу повітряного простору робочого середовища, а також емпіричного методу під час натурального експерименту та аналітичного аналізу отриманих результатів. **Результати.** Отримані результати дозволяють здійснювати оцінку аероіонного складу повітря та вплив на концентрацію пилу при використанні штучної іонізації повітря робочої зони. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель поточної концентрації аероіонів при штучній іонізації повітря в робочій зоні під час механічної обробки карбонвмісних волокнистих композитів, яка враховує особливості утворення карбонівих пилу, а саме геометричну форму пилових частинок та взаємодію елементів матриці і волокна композиційного матеріалу з аероіонами. **Практична цінність.** Використання штучної іонізації повітря робочої зони дозволяє прискорити процеси осадження виробничого пилу, який утворюється внаслідок механічної обробки волокнистих композиційних матеріалів, що дозволяє зменшити негативний вплив карбонівих пилу на здоров'я працівників.

**Ключові слова:** аероіони, пил вуглецевих композитів, моноаерозоль, осадження, респіраторна фракція.

### Вступ

Численні дослідження встановили зв'язок між забрудненнями повітря робочих зон виробничим пилом, включаючи аерозолі, біоаерозолі та аероалергени, та шкідливим впливом на здоров'я. Більшість респіраторних проблем тісно пов'язані з дрібними фракціями розміру частинок, які важко піддаються видаленню аспіраційними системами та засобами індивідуального захисту. Враховуючи значний рівень шкідливості волокнистого карбонівих пилу, доцільним є використання ефективних методів очищення повітря в приміщенні від дрібних і наддрібних аерозольних частинок. Незважаючи на те, що аспіраційні системи та нові модифікації респіраторів на достатньому рівні забезпечують захист працівника від пилового навантаження робочого простору, у якості альтернативного методу виникає необхідність оцінити здатність додаткової штучної іонізації робочого приміщення, які заряджають дрібнодисперсні пилові частинки, зменшувати концентрацію карбонівих пилу та мікроорганізмів у робочому середовищі працівника [1].

**Аналіз літературних джерел.** Будова карбонівих волокнистого композиту має шарувату структуру, армовану щільно укладеними пучками вуглецевих волокон та просочену матрицею (рис. 1), в якості якої може виступати як полімер (вуглець-полімерний композиційний матеріал), так і власне пірвуглець (вуглець-вуглецевий композиційний матеріал). При механічній обробці такого типу матеріалів у повітряний простір виділиться значна кількість пилу, який характеризується наявністю елементів як волокон, так і матриці, які в характеризується різною механікою утворення пилових частинок. При руйнуванні вони відрізняються геометричною формою, що необхідно враховувати при розробці аспіраційних систем, засобів індивідуального захисту та аероіонізаційному видаленні часточок респіраторної фракції з повітряного простору робітника.



**Рис. 1.** Загальна структура вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, армованого пучками вуглецевих волокон: а – загальний вигляд матеріалу, б – мікрофотографія структури композиту

Було проведено кілька досліджень повітряного простору та камерних експериментів, щоб перевірити доцільність зменшення частинок за допомогою іонізаторів повітря. Експериментальні дослідження показали, що концентрації дохідних речовин радону в закритому середовищі знижуються після застосування іонізатора повітря [1, 2]. В [3] автор наводить експеримент із видалення крейдяного пилу іонізатором, який демонструє значне зменшення концентрації крейдяного пилу з часом. В іншому дослідженні [2], автори використовували генератор негативних іонів, щоб перевірити його ефективність у зменшенні концентрації сигаретного диму в камері розмірами 0,5 м<sup>3</sup> та досягли шестикратного зниження його концентрації. Дослідження [4] дозволяє використовувати техніку іонного душу, застосування якого дозволяє значно знизити концентрації частинок пилу у повітрі в типовому офісному середовищі. Усі ці дослідження чітко демонструють необхідність застосування іонізаторів для очищення повітря. Однак також було відзначено два обмеження іонізаторів. Перше стосується утворення озону, а другий стосується створення субмікронних частинок внаслідок складних газофазних реакцій слідових компонентів,

присутніх поблизу коронного розряду. Очевидно, що зарядження частинок і електроміграція є основними механізмами, відповідальними за видалення частинок пилу, вони повинні бути пов'язані з концентрацією аероіонів і геометричними параметрами карбонового пилу та поєднані з уже існуючими (нормальними) процесами видалення.

### Результати дослідження

Серед найбільш перспективних засобів додаткової іонізації повітря є використання ультразвукового гідроаероіонізатора, принцип роботи якого засновано на балоелектричному ефекті та подрібненні води ультразвуком, який здатний нормалізувати аероіонний склад повітря та показники вологості робочого простору обробки карбону та уникнути утворення озону [5]. На основі відомих досліджень, було зроблено висновок, що пилові частинки, заряджені уніполярно випромінювані іони, відштовхуються та мігрують до внутрішніх поверхонь, що призводить до їх швидкого осідання на цих поверхнях. Таким чином, передбачається доцільність використання направленої дії гідроаероіонізатора саме в зону осередку пилоутворення.

Рекомбіновані внаслідок штучної іонізації аероіони мігрують у повітряному просторі та прикріплюються до пилових частинок карбонового композиту, які збільшують швидкість дрейфу до стінок через електричні поля, створені просторовим зарядом. На відміну від систем принцип роботи яких заснований на фільтрації або електростатичних фільтрів, де видалення частинок відбувається локально всередині приладу, у випадку застосування ультразвукового іонізатора повітря зменшення концентрації карбонового пилу здійснюються у загальному об'ємі робочого простору. Для кількісної оцінки ефективності видалення частинок пилу виключно за рахунок емісії аероіонів був визначений коефіцієнт очищення повітря ( $K_{On}$ ). Для кожного розміру частинок карбонового волокнистого пилу обробленого композиту з аеродинамічним діаметром  $d_a$  респіраторної фракції, який визначається як відношення концентрації пилу  $C_{ni}$ , виміряної в певний момент часу під час природного розпаду, до концентрації, виміряної в той самий момент часу, коли застосовувалась штучна іонізація повітря робочої зони  $C_{ui}$ :

$$K_{On} = \frac{C_{ni}(d_a, t)}{C_{ui}(d_a, t)}, \quad (1)$$

$K_{On}$  представлено як функцію аеродинамічного розміру частинок і тривалості генерації аероіонів. Концентрації пилу композиту  $C_{ui}$  також порівнювалися з початковим значенням  $C_{nui}$ , іонізатор ( $d_a, t=0$ ), а розпад характеризувався безрозмірним коефіцієнтом концентрації:

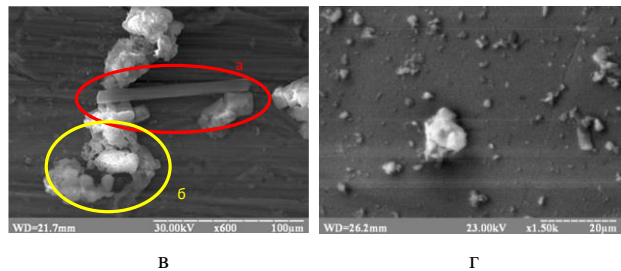
$$K_i = \frac{C_{ui}(d_a, t)}{C_{nui}(d_a, t=0)}, \quad (2)$$

Розподіл заряду частинок аероіонів можна оцінити за допомогою моделі дифузійного заряду [4]:

$$n(t) = \frac{d_n kT}{2K_e e^2} \ln \left[ 1 + \frac{\pi K_e d_n c_i e^2 N_i t}{2kT} \right], \quad (3)$$

де  $n(t)$  – це кількість елементарних зарядів, яких набуває частинка за час  $t$  за рахунок дифузійної зарядки;  $d_n$  – приведений фізичний діаметр частинки, який враховує особливості геометричної форми;  $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана;  $T$  – температура повітря (К);  $K_e = 9,0 \cdot 10^9$  Н м<sup>2</sup>Кл<sup>-2</sup> – електростатична стала;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – елементарний заряд;  $c_i$  – середня теплова швидкість іонів;  $N_i$  – кількість іонів у повітрі.

У розрахунках враховується особливості геометричної форми пилової частинки карбонового композиту ( $d_n$ ). Оскільки форми частинок пилу карбонового волокнистого композиту містять злами волокна і матриці [6, 7], рис. 2, в, вважаємо їх близькими до продовговуватих або тих, що містять різну форму. Виходячи з того, що динамічний коефіцієнт форми в цьому випадку становить  $\chi = 2,9..3$ , то  $d_n = \sqrt[3]{d_a^3/2,9}$  [8, 9].



**Рис. 2.** Мікрофотографія елементів осадженого пилу в – при обробці волокнистого карбонового композиту (а – елементи волокон; б – фрагменти матриці); г – на сталонний зразок через 5 хвилин після завершення свердлування

Перенос аероіонів в робочій зоні обумовлений впливом багатьох факторів. Для визначення поточної концентрації аероіонів у приміщеннях застосовуються наступні рівняння [10]:

$$\begin{aligned} \frac{dN^+}{dt} &= q_n(t) - \alpha N^+ N^- - \beta_e N^+ A + \\ &+ (N^+ - N_0^+(t)) - \lambda_i N^+; \\ \frac{dN^-}{dt} &= q_n(t) - \alpha N^+ N^- - \beta_e N^- A + \\ &+ (N^- - N_0^-(t)) - \lambda_i N^-, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $q_n, q_p$  – швидкість генерації негативних і позитивних іонів відповідно у робочій зоні;  $N^-, N^+$  – початкова концентрація негативних і позитивних іонів у робочому просторі;  $\alpha$  – швидкість рекомбінації аероіонів з аероіонами протилежної полярності;  $\beta_e$  – еквівалентна швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового пилу;  $A$  – поточна концентрація пилу;  $\lambda_i$  – електростатичне осадження аероіонів;  $t$  – час,  $N, N^+$  – поточні концентрації негативних, позитивних аероіонів відповідно.

У класичному варіанті дослідження процесів взаємодії частинок пилу і аероіонів прийнято використовувати поняття моноаерозоль, тобто вважається, що виробничий пил є однорідним і всі часточки однаково

швидко взаємодіють з аероіонами, однак у випадку композиційних матеріалів це припущення є невірним. Для отримання більш адекватного опису взаємодії було введено поняття  $\beta_e$  – еквівалентна швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового пилу який містить зламані карбонові волокна та елементи матриці. Запропонований коефіцієнт враховує відсоткове співвідношення пилових часточок армувального волокна та матриці (рис. 1), і є середньоарифметичним значенням швидкостей взаємодії кожного окремого елемента матеріалу з аероіонами. У випадку вуглець-вуглецевого композиту таке співвідношення встановили шляхом мікроскопічного аналізу осажденного пилу після механічної обробки:

$$\beta_e = \frac{0,4\beta_g + 0,6\beta_m}{2}$$

де  $\beta_g$  і  $\beta_m$  – швидкість комбінації аероіонів з частинками карбонового волокна і матриці відповідно)

Для опису масопереносу пилу використовується рівняння виду [10]:

$$\frac{dA}{dt} = q_A(t) + (A - A_0(t)) - \lambda_p A, \quad (5)$$

де  $q_A$  – швидкість генерації пилових частинок у робочому просторі, яка залежить від режимів обробки карбонового композиту;  $A_0$  – початкова концентрація частинок звичайного виробничого пилу;  $\lambda_p$  – електростатичне осадження карбонового пилу.

Наведемо ряд формул, які необхідні розрахунку параметрів моделі. Параметр розраховується відповідно до залежності [11]:

$$\lambda_i = \frac{b}{\varepsilon_0} (q_e + q_c eA), \quad (6)$$

де  $b$  – рухливість аероіонів;  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $q_e$  – щільність просторового заряду, яка може бути виражена як:

$$q_e = eN^- - eN^+, \quad (7)$$

де  $e$  – елементарний заряд.

Електростатичне осадження частинок можна визначити за формулою, наведеною у роботі [10]:

$$\lambda_p = \frac{D_p}{D_i} q_c \lambda_i, \quad (8)$$

де  $D_p$  і  $D_i$  коефіцієнти дифузії частинок карбонового пилу та аероіонів відповідно;  $q_c$  – характеристичне число зарядів.

Характеристичне число зарядів визначається виразом:

$$q_c = \left( 4\pi\varepsilon_0 d_n kT / e^2 \right) \times \left[ \ln \left[ 1 + \frac{d_n c p e^2 t}{4\varepsilon_0 kT} \right] - \ln \left[ 1 + \frac{d_n c n e^2 t}{4\varepsilon_0 kT} \right] \right], \quad (9)$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура;  $c$  – теплова швидкість аероіонів;  $d_n$  – приведений діаметр пилових часток;  $t$  – час.

Відзначимо, що в отриманих рівняннях, на відміну від класичної моделі Мауау  $Y$ . [10] (4, 5) запропоновані коефіцієнти, які враховують емісію негативних, позитивних аероіонів та пилу в робочому просторі від часу та від фракційного складу пилу волокнистого карбонового композиту. Таким чином ми враховуємо геометричну форму та швидкість взаємодій окремих частинок пилу, які містять елементи волокна і матриці, що за своєю природою відрізняються у такій взаємодії. Система наведених рівнянь замикається завданням початкових умов:

$$A|_{t=0} = A_0, \quad (10)$$

$$N^-|_{t=0} = N^-_0, \quad (11)$$

$$N^+|_{t=0} = N^+_0. \quad (12)$$

Дані умови визначають початкові значення величин концентрації пилу, негативних та позитивних аероіонів відповідно перед початком іонізації повітря у приміщенні. Але, дана модель матиме певну відповідність дійсності, якщо припустити, що всередині робочого простору відбувається достатній рух повітряних мас.

Аналіз отриманих даних та проведених досліджень призводить до того факту, що помітний вплив іонізації проявляється навколо джерела іонізації, де концентрація іонів вище. Підвищення пилоутворення при одночасній гідроаероіонізації генерують важкі іони, які утворюються при взаємодії легких іонів із карбоновим пилом. Важкі іони швидше осідають під великою вагою, що призводить до збільшення частинок пилу на поверхнях оброблювального обладнання. На концентрацію карбонового пилу також впливає вологість робочої зони, на меншій відстані від джерела іонізації при підвищеній вологості концентрація пилових частинок композиту очікувано буде вищою.

З метою визначення ефективності застосування процесу іонізації повітряного простору робочого місця було виконано порівняльне дослідження кількості осажденного пилу за допомогою растрового мікроскопу РЕМ-106-И (рис. 2, г) та аналітичних вагів RADWAG AS 60/220, а також концентрації пилових частинок у повітрі при якому порівнювалася швидкість осадження пилових частинок при обробці свердлуванням карбон-карбонового композиту у звичайних умовах та при використанні штучної іонізації при ідентичних режимах і параметрах свердлування.

Ефективність оцінювалася шляхом мікроскопічного порівняння і зважування на аналітичних вагах еталонних зразків площі осадження через проміжки часу, які становили 5 хв., 10 хв. та 30 хвилин, а також визначення концентрації пилу у робочій зоні свердлувальника за допомогою SDS011 сенсорів пилу PM2.5 та PM10.

Результати дозволяють констатувати, що використання гідроаероіонізації робочого повітряного

простору приміщення дозволяє прискорити осадження карбонового пилу в середньому на 19 % та зменшити його концентрацію у повітрі на 14 % через 10 хвилин після завершення процесів свердлування.

### Висновки

Застосування штучної гідроаероіонізації повітряного робочого простору приміщення дозволяє пришвидшити процеси осадження пилових частинок, які утворюються при механічній обробці карбонвмісних волокнистих композитів, що дозволяє зменшити негативний вплив карбонового пилу на здоров'я працівників.

Пил волокнистих карбонових композитів при механічній обробці не можна представити у вигляді

моноаерозолу, оскільки він містить елементи як матриці, так і армувальних волокон у складі, які відрізняються за своїми параметрами та структурою. Розроблена математична модель урахування аероіонного складу повітря та його взаємодії дозволяє враховувати особливості утворення пилу, його фракційного складу, різнокомпонентність, геометричну форму, а також початкову концентрацію пилу робочої зони.

Проведені натурні експерименти визначення ефективності застосування штучної гідроаероіонізації з метою осадження виробничого пилу робочого простору підтвердили його доцільність та довели зменшення концентрації пилу у повітрі робочого простору на 14 % через 10 хвилин після припинення свердлування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sawant V., Meena G. and Jadhav D. (2012). Effect of Negative Air Ions on Fog and Smoke. *Aerosol Air Qual. Res.* 12: 1007-1015. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.11.0214>
2. Kunal Ghosh, S. N. Tripathi, Manish Joshi, Y. S. Mayya, Arshad Khan & B. K. Sapra (2021) Effect of charge on aerosol microphysics of particles emitted from a hot wire generator: Theory and experiments, *Aerosol Science and Technology*, 55:9, 1084-1098, DOI: 10.1080/02786826.2021.1931011.
3. K. L. Aplin and R. G. Harrison, The interaction between air ions and aerosol particles in the atmosphere, *Int. Phys. Conf. Ser. No 163 411 Paper presented at the 10th Int. Conf., Cambridge, 28-31 March 1999*, 411-414.
4. Zygmunt Grabarczyk, Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers, *Journal of Electrostatics*, Volumes 51–52, 2001, Pages 278-283, ISSN 0304-3886, [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00058-4).
5. В. В. Ченчевой, С. В. Сукач, О. О. Ченчева, Н.С. Федорова Д. С. Григор'єва Дослідження параметрів гідроаероіонного складу повітря робочого приміщення з ультразвуковою іонізацією, *ВІСТІ Донецького гірничого інституту №2 (47)*, 2020, 168-175. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175>
6. 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>
7. Ченчева О. (2023). Аналіз фракційного складу пилу робочої зони при свердлуванні композиційних матеріалів на основі карбонових волокон. *Екологічна безпека та природокористування*, 46(2), 100–108. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.100-108>
8. Uk Lee B, Yermakov M, Grinshpun SA. Removal of fine and ultrafine particles from indoor air environments by the unipolar ion emission. *Atmos Environ* (1994). 2004 Sep;38(29):4815-4823. doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.010. Epub 2004 Aug 12. PMID: 32834730; PMCID: PMC7319258.
9. Ветошкін А. Г., Таранцева К. Р. *Технологія захисту навколишнього середовища (теоретичні основи): Навчальний посібник. Вид-во технол. ен-та, 2004. - 249 с.*
10. Y. S. Mayya, B. K. Sapra, Arshad Khan, Faby Sunny, Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments, *Journal of Aerosol Science*, Volume 35, Issue 8, 2004, Pages 923-941, ISSN 0021-8502, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.03.00>
11. Noakes, C. J., Sleight, P. A. and Beggs, C. (2007) Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms - Roomvent 2007*. Roomvent 2007, 13-15 June 2007, Helsinki.

Received (Надійшла) 11.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.04.2024

### Mathematical simulation of dust settlement processes of carbon composites during artificial ionization of the air in the working area

Olga Chencheva

**Abstract. Purpose.** Mathematical modeling of the interaction of aeroions with multi-fraction dust particles of fibrous carbon composites of undefined geometry, which include both matrix elements and carbon fiber fractures. **Method.** The modeling was carried out by deriving new predicted dependencies of the interaction of aeroions with dust elements, which is based on the application of aerodynamics, electrostatics and mass transfer equations, taking into account the peculiarities of the dust and fractional composition of the air space of the working environment, as well as the empirical method during the field experiment and analytical analysis of the obtained results. **Results.** The obtained results make it possible to evaluate the aeroionic composition of the air and the effect on the dust concentration of the artificial ionization of the air in the working area. **Scientific novelty.** The mathematical model took into account the peculiarities of dust formation during the processing of fibrous carbon composites, the geometric shape of the formed dust particles and the speed of interaction of individual dust components containing elements of the matrix and fibers of the composite material with aeroions of the air during artificial ionization of the working space. **Practical value.** The use of artificial ionization of the air in the working area allows you to accelerate the deposition of industrial dust, which is formed as a result of the mechanical processing of fibrous composite materials, which allows you to reduce the negative impact of carbon dust on the health of workers.

**Keywords:** aeroions, dust of carbon composites, monoaerosol, deposition, respiratory fraction.