

**EXPERIMENTAL PHYSICS****ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ «ЗАХОПЛЕННЯ» ПИЛУ КРАПЛЕЮ ВОДИ****Біляєв М.М.**

д.т.н., професор,  
кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика»  
Український державний університет науки і технологій  
<https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

**Козачина В.А.**

к.т.н., доцент,  
кафедра природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін  
ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
<https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

**Кіріченко П.С.**

к.т.н., доцент,  
кафедра «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція»  
Криворізький національний університет  
<https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

**Біляєва В.В.**

д.т.н., професор,  
кафедра «Енергетичні системи та енергоменеджмент»  
Український державний університет науки і технологій  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

**Попруга Д.В.**

к.т.н., доцент  
декан будівельного факультету  
Криворізький національний університет  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7567-6484>

**STUDY OF THE PROCESS OF DUST CAPTURE BY A DROP OF WATER****Biliaiev M.**

D. Sc. (Tech.), Prof.,  
dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-7882>

**Kozachyna V.**

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
dep. «Natural Sciences and General Engineering Disciplines»  
LLC «Technical University «METINVEST POLYTECHNIC»  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6894-5532>

**Kirichenko P.**

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation»  
Kryvyi Rih National University  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4031-7693>

**Biliaieva V.**

D. Sc. (Tech.), Prof.,  
dep. «Energy Systems and Energy Management»  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2399-3124>

**Popruha D.**

Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
Dean of Civil Engineering Faculty  
Kryvyi Rih National University  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7567-6484>

**Анотація**

Зниження пилового забруднення повітря в робочих зонах є важливою задачею в галузі охорони праці та екологічної безпеки. Поширеним засобом зменшення пилового забруднення повітря є подача води в пилову хмару. Але для раціонального подавлення пилу потрібно знати закономірності взаємодії «крапля

води+пил». В роботі наведено результати експериментальних досліджень по визначенню маси пилу, що «захоплює» крапля води при русі. На основі проведених експериментів побудовано емпіричні моделі. Розглянуто побудову чисельної моделі для аналізу розсіювання пилу та крапель води в повітрі.

### Abstract

Reducing dust pollution in the air in work areas is an important task in the field of occupational health and safety and environmental safety. A common means of reducing dust pollution in the air is to spray water into the dust cloud. However, in order to suppress dust effectively, it is necessary to understand the patterns of interaction between water droplets and dust. This paper presents the results of experimental studies to determine the mass of dust “captured” by a water droplet in motion. Empirical models were constructed based on the experiments. The construction of a numerical model for analyzing the dispersion of dust and water droplets in the air is considered.

**Ключові слова:** пилове забруднення повітря, взаємодія «крапля води+пил», експеримент, математична модель масопереносу.

**Key words:** air pollution, «water dropl+dust» interaction, experiment, mathematical model of mass transfer.

### Вступ

Пилове забруднення робочих зон створює загрозу здоров'ю працівників та потребує розробки ефективних методів знепилювання на різних підприємствах [1, 4, 10]. Відомо, що подача води в пилову хмару або шлейф є засобом, що широко використовується для боротьби з пиловим забрудненням повітря на промислових майданчиках. Але для забезпечення потрібних умов праці необхідно науково обґрунтовано здійснювати подачу води в область пилового забруднення. При розробці регламенту подачі води для знепилювання, як особливо важливої задачі в галузі охорони праці та екологічної безпеки, вкрай важливим аспектом є визначення ефективності подачі води в пилову хмару з метою зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони. Відомо, що принцип знесення базується на «захопленні» краплею води часток пилу. Під ефективністю розуміється кількість (маса) вугільного пилу, що може бути «захоплена» краплею води, що рухається в пиловому середовищі. Визначення ефективності такого «захоплення» пилових часток є дуже важливим для розробки науково-обґрунтованої стратегії знепилювання.

Слід зазначити, що дослідження цього процесу, зокрема, з метою визначення кількості (маси) пилу, що може захопити крапля води, є досить скла-

дним дослідженням. Існують напівемпіричні моделі для рішення даної задачі. Аналіз літературних джерел [1-3, 5-8] показав, що розвиток теоретичних методів дослідження залишається важливою задачею в даній області.

### Мета

Експериментальне дослідження ефективності «захоплення» краплею води пилу та розробка чисельної моделі масопереносу пилу та крапель води в повітрі.

### Методика

Для оцінювання процесу «захоплення» краплею води використовувався метод фізичного експерименту. Для моделювання процесу розповсюдження крапель води та пилу в повітрі побудовано 2D чисельні моделі масопереносу.

**Експериментальні дослідження.** Розглядається процес скочування краплі води по пластині (матеріал пластини – пінопласт, незмочувана поверхня) на якій є частки вугільного пилу. Маса пилу на пластині 0,5 г розподілялася на площині у вигляді прямокутника розмірами 7см×5см. На пластину подавалась крапля води, яка скочувалась по пластині (рис. 1) та попадала у ємність, що розташована під пластиною (пластина розташована під кутом 60°). Далі проводилось вимірювання маси цієї краплі, що містила вугільний пил на своїй поверхні.

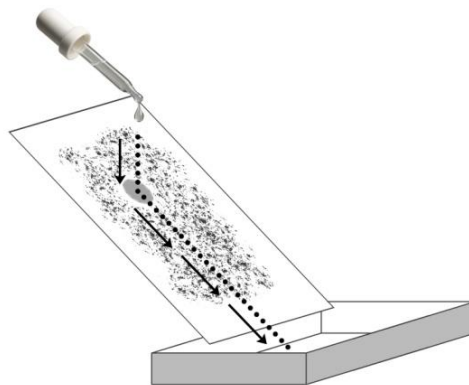


Рис. 1. Схема скочування каплі води по поверхні, що забруднена вугіллям

Експеримент проводився для трьох середніх значень маси краплі води: 0,05 г; 0,07 г; 0,1 г (рис.2).

Довжина шляху скочування краплі води складала 1,5 см від кінця пластини («короткий» шлях руху) та 6 см від кінця пластини («довгий» шлях

руху). Різний шлях скочування встановлювався з метою визначити, чи потрібен «значний» час на «прикріплення» часток пилу до краплі та чи лімітована маса пилу, що може бути «захоплена» краплею

води (рис.3). Здійснювалася відеозйомка процесу, що моделювався.



Рис. 2. Зважування «чистої» краплі води

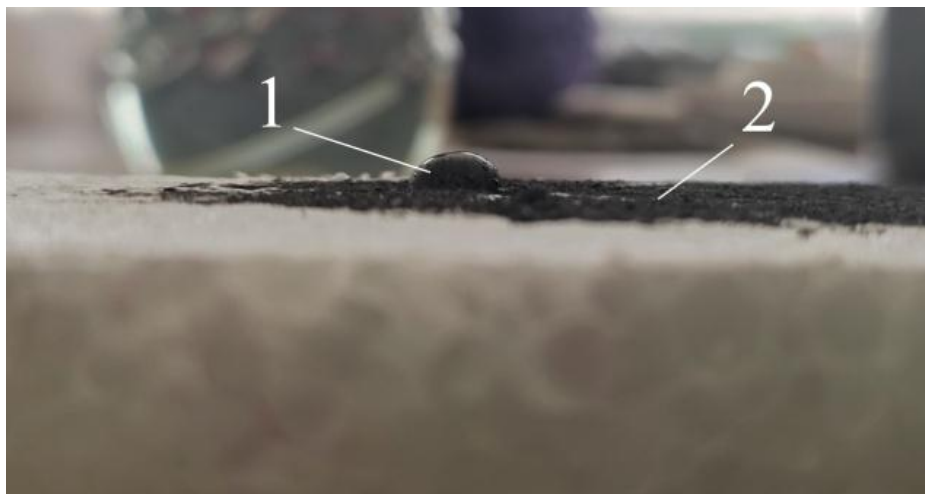


Рис. 3. «Крапля води+вугільний пил» на поверхні пластині:  
1 – крапля; 2 – поверхні з вугільним пилом

Проведені дослідження показали наступне:

1. Захоплення краплею води вугільного пилу відбувається, практично, «миттєво», так як не було різниці в масі вугільного пилу, що «захоплена» при короткому «шляху» краплі або при довгому «шляху» краплі. Час руху на «короткому» шляху дорівнював, в середньому,  $t_{\max}=0,3$  с. Тобто, після 0,3 с припиняється «захоплення» пилу. Таким чином, при практичних розрахунках можна прийняти, що протягом 0,3 с крапля «захоплює» максимально можливу масу вугільного пилу.

2. Середнє значення маси вугільного пилу, що «захоплене» краплею води таке:

- 0,01 г пилу, при масі краплі 0,05 г (тобто 17 % від маси краплі);
- 0,013 г пилу, при масі краплі 0,07 г (тобто 18 % від маси краплі);
- 0,02 г пилу, при масі краплі 0,1 г (тобто 19 % від маси краплі).

В середньому, можна приймати, що крапля води захоплює кількість пилу, що відповідає приблизно 18 % маси краплі. Далі, при побудові математичної моделі даного процесу, буде використовуватися це значення у долях одиниці, тобто «0,18». Це значення використовується далі для побудови мате-

матичної моделі (1). Таким чином, експериментальним шляхом підтверджено робочу гіпотезу, що була висунута.

Можна дати таке пояснення отриманим експериментальним даним: кількість вугільного пилу, що «захоплює» крапля води, пропорційна площі поверхні краплі: зі збільшенням маси краплі збільшується площа її поверхні, а значить збільшується поверхня контакту краплі з частками пилу.

Якщо прийняти, що процес «захоплення» пилу відбувається за лінійною залежністю, то можна, на основі отриманих експериментальних даних, отримати емпіричну модель, що дозволяє визначити масу пилу, що «захоплює» крапля води за час  $t$ . Модель має вигляд:

$$Q_c(t) = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}} t, \quad (1)$$

де  $M_w$  – маса краплі води, г;  $k=0,18$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує можливість краплі «захопити» вугільний пил;  $Q_c(t)$  – маса пилу, що «захоплює» крапля води за час  $t$  (мінімальне значення цього параметру «0», максимальне значення цього параметру  $t_{\max}=0,3$  с).

Можна також навести інший вигляд емпіричної моделі, а саме:

$$M_c(t) = k \cdot M_w - (0,3 - t)\alpha \quad (2)$$

де  $M_c$  – маса пилу;  $t$  – час, с;  $\alpha = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}}$ .

Здійсимо математичний аналіз побудованої емпіричної моделі (2) на основі теорії границь. Для цього знайдемо границю даної залежності при  $t \rightarrow 0$ . Маємо:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} (k \cdot M_w - (0,3 - t)\alpha) &= k \cdot M_w - (0,3 - t_{\max})\alpha = \\ &= k \cdot M_w - (0,3 - 0,3)\alpha = k \cdot M_w \end{aligned} \quad (4)$$

Як можна бачити з (4), при  $t \rightarrow t_{\max}$  отримане значення  $kM_w$  дорівнює максимальній масі вугільного пилу, що може «захопити» крапля води за час  $t_{\max} = 0,3$  с. Це значення також відповідає фізиці процесу, що моделюється. Таким чином, математичний аналіз отриманої емпіричної моделі, на основі

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (5)$$

де  $S$  – концентрація пилу (крапель води);  $t$  – час;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти турбулентної дифузії;  $Q_{Si}$  – інтенсивність емісії пилу (емісія від штабелю вугілля, викид пилу при розвантажувальних роботах тощо) або інтенсивність емісії крапель води;

$\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$  – дельта-функція Дірака;  $x_i, y_i$  – координати розташування джерела емісії.

Крайові умови для рівняння масопереносу розглянути [1, 2].

Для чисельного інтегрування рівняння (5) здійснюється його фізичне розщеплення:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (8)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (6) застосовується така двокрокова змінно-трикутна схема розщеплення [2]:

– на першому кроці:

$$\begin{aligned} S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} &= S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2} \end{aligned} ;$$

– на другому кроці:

Таким чином, при  $t \rightarrow 0$  маса пилу, що «захоплює» крапля води, дорівнює 0. Це значення відповідає фізиці процесу, що моделюється.

З іншого боку, розглянемо границю залежності (2) при  $t \rightarrow t_{\max}$ , тобто інший крайній випадок. Маємо:

теорії границь, підтверджує коректність побудованої моделі (2).

**Модель масопереносу.** Для моделювання процесів переносу пилу та крапель води в повітрі використовується рівняння масопереносу.

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} +$$

$$+ \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де  $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$ ,  $u^- = \frac{u - |u|}{2}$ .

Для чисельного розв'язку рівняння (7) застосовується така двокрокова змінно-трикутна схема розщеплення [2]:

– на першому кроці:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2};$$

– на другому кроці:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

де  $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$ ,  $v^- = \frac{v - |v|}{2}$ .

Для чисельного інтегрування рівняння (8) використовується метод Ейлера. Здійснено комп'ютерну реалізацію побудованої чисельної моделі.

### Висновки

1. Експериментальним шляхом здійснено оцінювання маси вугільного пилу, що «захоплює» крапля води, що рухається.
2. На основі обробки даних експерименту отримано емпіричні моделі для оцінювання швидкості «захоплення» вугільного пилу краплею води.
3. Побудовано чисельну модель масопереносу, що може бути використана для аналізу ефективності використання подачі води для зменшення пилового забруднення повітря.
4. Подальший розвиток даного напрямку буде присвячений розробці тривимірної моделі масопереносу пилу та крапель води.

### Список літератури

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на

робочих місцях: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. – 268 с.

2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде/М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук.думка, 1997. – 368 с.

3. Alvarez J. T., Alvarez I. D. & Lougedo S. T. Dust barriers in open pit blasts. Multifase Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XVI, Vol 116. 2008. P. 85-93.

4. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. *Information Circular/* Jay F. Colin et al, IC 9517, Department of Health and Human Services, Pittsburgh, PA, Spokane, WA, January 2010. 30 p.

5. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling Coal Dust Dispersion from Pile with Protection Barriers. E3S Web of Conferences. Vol. 168: 2nd Intern. Conf. Essays of Mining Science and Practice, Dnipro, Ukraine, 22–24 April 2020. P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016800021.

6. Biliaiev, Mykola & Biliaieva, V & Kozachyna, Vitalii & Berlov, Oleksandr & Oladipo, Mutiu & Kirichenko, P. (2020). Reducing of coal dust release from train wagon with barrier. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 985. 012018. 10.1088/1757-899X/985/1/012018.

7. Ferreira AD, Viegas DX, Sousa ACM. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 91(10), P. 1271–1283

8. Ferreira, AD, Vaz P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. 92. P. 565–577.

9. Kirk Winges, Richard Steffel Coal Dust from Rail Transport. Ramboll Environ US Corporation, 19020 33rd Avenue, Suite 310, Lynnwood, Washington 98036, 425-412-1800, 14 p.

10. Reed W. R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. DHHS (NIOSH) Publication. 2005 – 138, Pittsburgh, PA, 2005. P. 24.