УДК 504.054; 622.807.2 DOI: https://doi.org/10.15407/geotm2018.143.110

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КАРБОНОВМІСНОГО ПИЛУ В ГРАВІТАЦІЙНИХ ТА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ПОЛЯХ

[1]Горобей М. С.

[1]Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ КАРБОНСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛИ В ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

[1]Горобей М. С.

[1]Государственная экологическая академия последипломного образования и управления

THEORETICAL RESEARCH OF THE SUPPRESSION PROCESS OF CARBON-CONTAINING DUST IN GRAVITATIONAL AND ELECTROSTATIC FIELDS

[1]Horobei M.S.

[1]State Environmental Academy of Postgraduate Education and Management

Анотація. В результаті функціонування вугледобувних та вуглепереробних підприємств до атмосфери потрапляють значні обсяги карбоновмісного пилу. Викинутий через вентиляційні системи шахт грубодисперсний пил інтенсивно осідає в межах санітарно-захисних зон шахт. Тонкодисперсний пил виноситься за їх межі, забруднюючи довкілля на відстані до 3500 м від вугільної шахти. Забруднення атмосферного повітря та зміна екологічних параметрів мають повільний, накопичувальний ефект негативних наслідків, що виявляється через багато десятиліть. Це призводить до порушення екосистеми і загрожує здоров'ю людини. Карбоновмісний пил небезпечний як сам по собі, так і як транспортер в організм людини і тварин шкідливих і отруйних речовин, які осідають на тонкодисперсних частках вугілля. Екологічна небезпека викидів карбоновмісного пилу зумовлює необхідність проведення заходів щодо знепилювання шахтних вентиляційних потоків і зниження викидів пилу до атмосфери. У статті наведено результати досліджень процесу пилоподавлення зваженого у повітрі карбоновмісного пилу за допомогою розпиленої води, з урахуванням дії гравітаційних і електростатичних полів. У якості вихідних даних у роботі були використані результати робіт МакНДІ, отримані під час проведення експериментів з гідрознепилення на лабораторному стенді у електростатичному полі. Було встановлено, що в активній зоні дії факела зрошення ефективність подавлення пилу визначається величиною вектора швидкості крапель рідини. За межами активної зони ця ефективність визначається величиною швидкості падіння крапель і електростатичними силами. Показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними. Отримані результати дозволяють розкрити механізм взаємодії розпиленої рідини з карбоновмісним пилом у гравітаційному і електростатичному полях та можуть бути використані для розробки нових ефективних засобів боротьби з пилом.

Ключові слова: карбоновмісний пил, гравітаційні поля, електростатичні поля, пилоподавлення, турбулентний режим

Проблемі боротьби з карбоновмісним пилом присвячений ряд робіт вітчизняних і зарубіжних вчених [1-7]. При проведенні досліджень, було зроблено припущення про те, що за межами динамічно активної (турбулентної) зони дії факела, рух крапель рідини стане стаціонарним, оскільки їх швидкості практично зрівняються зі швидкістю вентиляційного потоку. При цьому відносна швидкість руху диспергованої рідини стане рівною швидкості осадження крапель під дією сил гравітації $U = \upsilon_2$. У цьому випадку можна прийняти час, як відношення відстані до швидкості руху повітря: $t = x/u_0$. Тоді зміна концентрації пилу за межами активної зони буде відбуватися не за часом, а за довжиною виробки, і рівняння руху можна записати у вигляді:

© М.С. Горобей, 2018

$$\frac{dC}{dx} = -e\frac{3}{2\rho}\frac{d_ч + 0{,}77 d_k C_1 / Z_1}{d_ч d_k}\frac{\upsilon_2}{u_0} CZ \qquad (1)$$

де C – концентрація пилу в розглядаємому об'ємі, кг/м^3; e – коефіцієнт захоплення часток пилу; ρ – щільність, кг/м^3; d_k – середньогармонічний діаметр крапель рідини, м; $d_ч$ – середньогармонічний діаметр часток вугільного пилу, м; C_1 – концентрація пилу в кінці активної зони факелу, кг/м^3; Z_1 - початкова концентрація диспергованої води, кг/м^3; υ_2 - швидкість осадження крапель під дією сил гравітації, м/с; u_0 - швидкість руху повітря, м/с; Z – концентрація крапель рідини в розглядаємому об'ємі, кг/м^3.

Функція концентрації рідини за межами активної зони, що входить до виразу, буде залежати не від часу, а від відстані до активної зони. В результаті рівняння зміни концентрації можна записати у вигляді

$$Z(x) = Z_1 \exp\left[-\left(\frac{k\upsilon_2}{h} + \frac{\gamma\Omega}{S}\right) x / u_0\right] \qquad (2)$$

де k – коефіцієнт неравномірного розподілу крапель рідини по висоті; h - висота виробки, м; γ – коефіцієнт втрат крапель рідини на стінках виробки, м/с; Ω - тілесний або просторовий кут; S - площа сферичної поверхні, на яку спирається тілесний кут.

Тут під функцією початкової концентрації Z_1 будемо мати на увазі сумарну відносну витрату рідини, нехтуючи її втратами в активній зоні:

$$Z_1 = nq_ф / Q_0 \qquad (3)$$

де n – кількість факелів форсунок в аналізованому об'ємі; $q_ф$ – витрата крапельної рідини через одну форсунку, кг/с; Q_0 – витрата повітря, м^3/с.

Представимо коефіцієнт e захоплення часток пилу за межами активної зони у вигляді суми двох коефіцієнтів:

$$e = e_{гр} + e_e \ , \qquad (4)$$

де $e_{гр}$ – коефіцієнт захоплення при дії гравітаційних сил; e_e – коефіцієнт захоплення при дії електростатичних сил.

Згідно з даними досліджень [8], коефіцієнт захоплення при дії електростатичних сил може бути визначений за формулою

$$e_e = \frac{16\left|q_ч q_k\right|}{3\pi\mu\upsilon_2 d_ч (d_k^2 - d_ч^2)}, \qquad (5)$$

де $q_ч$ – середній електростатичний заряд часток пилу, Кл (кг^{0,5}м^{1,5}/с); $q_к$ – середній електростатичний заряд крапель рідини, Кл (кг^{0,5}м^{1,5}/с); μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, кг/(м·с).

Оскільки $d_ч << d_k$, то з достатнім ступенем точності формулу (5) можна представити у вигляді

$$e_e = \frac{16\left|q_ч q_k\right|}{3\pi\mu\upsilon_2 d_ч d_k^2} \tag{6}$$

Беручи усі параметри, що входять до рівняння (1) за константу, крім функції **Z**, і підставляючи її вираження (2) в (1), отримаємо після інтегрування

$$C(t) = C_1 \exp\left[-\frac{3(Z_1 / d_k + 0{,}77 C_1 / d_ч)}{2\rho} \frac{(e_{гр} + e_e)\upsilon_2}{k\upsilon_2 / h + \gamma\Omega / S} \left\{ 1 - \exp\left[-(k\upsilon_2 / h + \gamma\,\Omega / S)x / u_0 \right] \right\} \right] \tag{7}$$

Сумарний ефект пилоподавлення у полі гравітаційних і електростатичних сил має місце, коли експонента у формулі (7) мала у порівнянні з одиницею. Тоді ймовірність пилеподавлення за межами активної зони може бути визначена як добуток ймовірностей

$$P_2 P_3 = C / C_1 = \exp\left[-\frac{3(Z_1 / d_k + 0{,}77 C_1 / d_ч)}{2\rho} \frac{(e_{гр} + e_э)\upsilon_2}{k\upsilon_2 / h + \gamma\Omega / S} \right], \tag{8}$$

де P_2 – ймовірність пиловловлювання у полі гравітаційних сил (e_e = 0); P_3 - ймовірність пиловловлювання в поле електростатичних сил ($e_{гр}$ = 0).

Формула (8) ще більш спрощується, якщо знехтувати з деяким "запасом" площі, заповненої пилом в порівнянні з площею, заповненої диспергованою рідиною, в результаті чого з урахуванням (3) отримаємо

$$P_2 P_3 = C / C_1 = \exp\left[-\frac{3nq_ф / d_k}{2\rho Q_0} \frac{(e_{гр} + e_e)\upsilon_2}{k\upsilon_2 / h + \gamma\Omega / S} \right] \tag{9}$$

Оскільки процеси уловлювання часток пилу краплями рідини в активній зоні факела і за його межами незалежні один від одного, то загальна імовірність пилоподавлення визначається з урахуванням (9) за формулою

$$P = P_1 P_2 P_3 = \exp\left[-\frac{3nq_ф / d_k}{2\rho Q_0} \left\{ \frac{e_0 k_ф S_ф l}{S} + \frac{(e_{гр} + e_e)\upsilon_2}{k\upsilon_2 / h + \gamma\Omega / S} \right\} \right] \tag{10}$$

Аналіз даних [7-9] з розрахунку коефіцієнта захоплення часток пилу діаметром 10 мкм і більше показує, що в полі гравітації з достатнім ступенем точності може бути використана формула

$$e_{гр} = \frac{d_ч^2}{d_ч^2 + 32000 / d_k} \tag{11}$$

На рис. 1 показана залежність коефіцієнта захоплення часток пилу краплями рідини в гравітаційному полі при різних діаметрах часток. Там також нанесені розрахункові криві залежності (10).

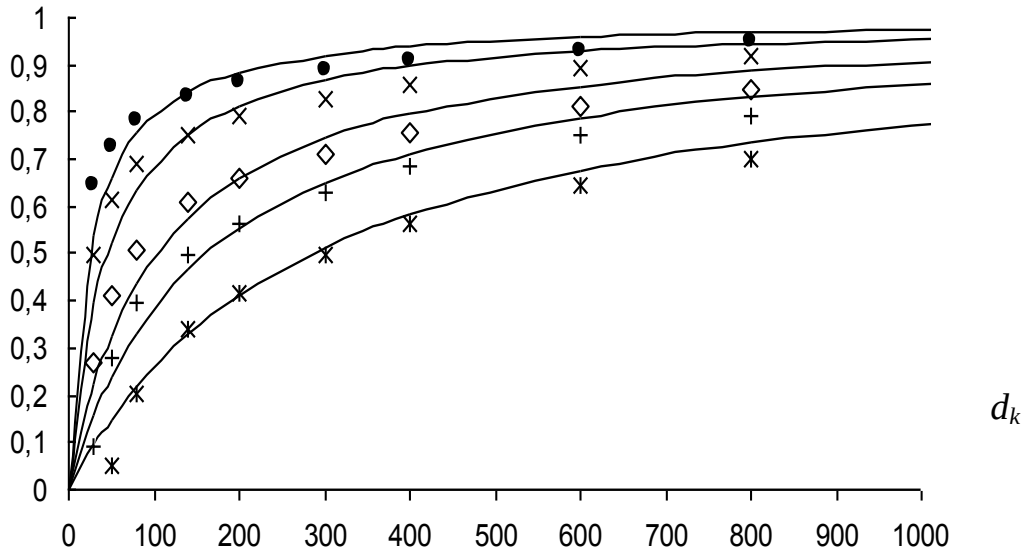

Рисунок 1 - Залежність коефіцієнту захоплення часток пилу від діаметра крапель рідини при різних діаметрах часток (ж – 10 мкм, + – 14 мкм, ◊ – 17,5 мкм, × - 26 мкм, ● – 35 мкм)

За даними МакНДІ [10] середній медіанний діаметр зважених часток вугільного пилу в очисних вибоях Донбасу становить 20 - 30 мкм. При цьому вказується, що зміст тонкодисперсного пилу (менше 10 мкм) коливається в межах 12 - 27%. Такі частки повинні вловлюватися електростатичними методами.

На рис.2 представлена залежність імовірності пилоподавлення у полі гравітації від концентрації розпиленої рідини при дії 6-ти форсунок.

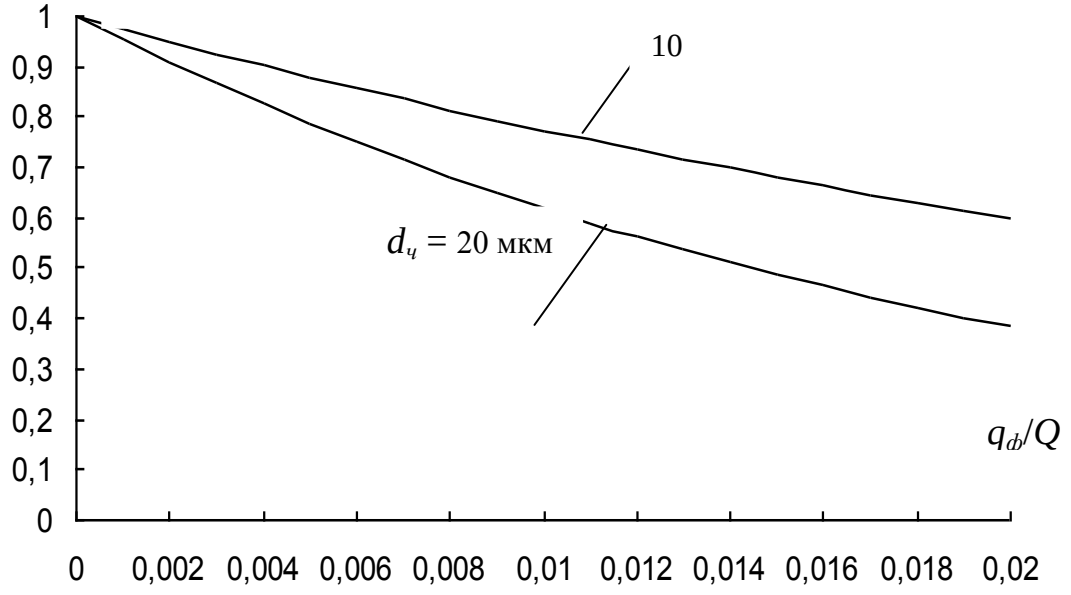

Рисунок 2 - Імовірність пиловловлювання у полі гравітації за межами активної зони факела залежно від відносної витрати розпиленої рідини при дії 6-ти конусних форсунок і різних діаметрів часток пилу

Розрахунки проводилися за формулами (9) та (11) при діаметрах часток пилу 10 і 20 мкм, висоті виробки h = 3 м, коефіцієнті нерівномірності швидкості падіння k = 2 і при відсутності електростатичного поля. Втрати на стінках вироблення приймалися нехтовно малими (γ = 0).

Як показують результати розрахунку, імовірність пиловловлювання часток пилу в полі гравітації тим менше, чим менше їх діаметр. Так, при діаметрі часток 10 мкм можна зменшити його концентрацію до 60%, а при середній концентрації пилу 20 мкм, вона зменшується в гравітаційному полі до 40%.

Імовірність пиловловлювання під дією електростатичних сил може бути визначена за формулою (5) з урахуванням (8) при $e_{гр}$ = 0. У результаті отримаємо

$$P_3 = \exp\left[-\frac{3nq_ф / d_k}{2\rho Q_0} \left\{ \frac{16\left(q_ч q_k\right(}{3\pi\mu d_ч d_k^2} \frac{1}{kv_2 / h + \gamma\Omega / S} \right\} \right] \qquad (12)$$

Зазвичай ймовірність пиловловлювання електростатичним методом оцінюється шляхом вимірювання напруженості електричного поля водного аерозолю. Ця напруженість (В / м) визначається за формулою

$$E_k = \frac{|q_k|}{\varepsilon\pi d_k^2}, \qquad (13)$$

де ε – діелектрична постійна, пов'язана з проникністю середовища.

Аналогічно (13) напруженість електричного поля пилового аерозолю знаходиться за формулою

$$E_ч = \frac{|q_ч|}{\varepsilon\pi d_ч^2} \qquad (14)$$

З урахуванням (13) і (14) формула (12) набуде вигляду

$$P_3 = \exp\left[-\frac{8nq_ф}{\rho Q_0} \left\{ \frac{\pi\varepsilon^2 d_ч / d_k}{\mu} \frac{E_ч E_k}{kv_2 / h + \gamma\Omega / S} \right\} \right], \qquad (15)$$

де $E_ч$ – напруженість електричного поля пилового аерозолю, В/м [(кг/м)^{0,5}/с]; E_k – напруженість електричного поля водного аерозолю, В/м [(кг/м)^{0,5}/с].

Аналіз отриманої залежності (15) показує, що при зменшенні крапель рідини істотно збільшується імовірність пиловловлювання. При цьому необхідно враховувати електробаланс системи з тим, щоб напруженість водного аерозолю не перевищувала напруженості пилового потоку ($E_к \le E_ч$). Перевищення цієї напруженості приведе до зайвих втрат електростатичного енергії.

На рис.3 представлено залежність імовірності пиловловлення від напруженості електричного поля водного аерозолю при наступних вихідних даних: $E_п$ = 1200 В/м; n = 1; $q_ф$ = 0,2 кг/с; Q_0 = 0,64 м^3/с; μ = 1,95·10^{-5} кг/(м·с); k = 2 ; $d_ч$ = 10^{-5} м; d_k = 2·10^{-4} м; h = 0,7 м; γ = 0.

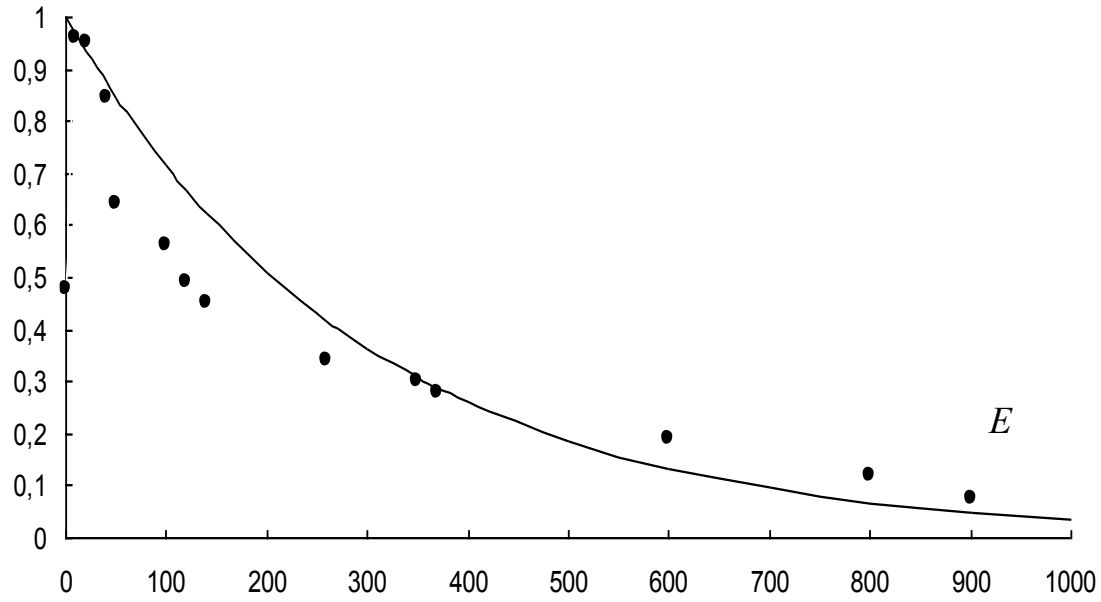

Рисунок 3 - Імовірність пиловловлювання в електростатичному полі за межами активної зони факела залежно від напруженості водного аерозолю (кружечками позначені дослідні дані МакНДІ [10])

Як показують результати розрахунку, напруженість пилового потоку також відіграє велику роль, збільшуючи ймовірність гідрознепилення. Однак результуючий і максимальний ефект буде досягнутий, коли два заряди, протилежних за знаком і величиною, компенсуються, а напруженості електричних полів зрівняються ($E_ч = E_к$).

Таким чином, розроблена математична модель динаміки пилових і диспергованих водних потоків і результати дослідження їх взаємодії в гравітаційному і електростатичному полях дозволяють науково обґрунтовано визначити раціональні параметри факела зрошення. Ще більшу достовірність результатів теорії дозволять підтвердити додаткові експериментальні дослідження в даному напрямку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саранчук В.И., Рекун В.В., Тамко В.А. Пути повышения эффективности пылеподавления орошением. // Уголь Украины. 1981. № 9. С. 33-34.

2. Медведев Э.Н., Коренев А.П., Скляров Л.И.. Совершенствование способов обеспыливания при щитовой выемке крутых пластов // Уголь Украины. 1983. № 2. С. 26-27.

3. Мальцев В.Н., Кашуба О.И., Гамза Н.А.. Новый смачиватель для борьбы с угольной пылью // Уголь Украины, 2002, №1, С. 29.

4. Козлюк А.И. Водоснабжение угольных шахт для борьбы с пожарами и пылью. М.: Недра, 1979. 287 с.

5. Ищук И.Г., Поздняков Г.А.. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий. Справочник. М.: Недра, 1991. 251 с.

6. Фон Фельзен-Цервек В. Пути повышения уровня безопасности в каменноугольной промышленности. Глюкауф (рус. пер.). 1991, № 17/18. С. 6-19.

7. Кудряшов Р.Р., Воронина Л.Д., Шуринова М.К., Воронина Ю.В., Большаков В.А.. Смачивание пыли и контроль запылённости воздуха в шахтах. М.: Наука, 1979. 196 с.

8. Саранчук В.И., Качан В.Н., Рекун В.В. и др. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли. Киев: Наук. Думка, 1984. 216 с.

9. Журавлёв В.П., Цыцура А.А., Кудрявцев А.А. Применение гидрообеспыливания на предприятиях чёрной металлургии и в угольной промышленности. – Караганда, 1982. – 22 с

10. Кошуба О.И.. Работы МакНИИ в области борьбы с рудничной пылью // Сб. науч.тр.: Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч.тр. МакНИИ, 2000. С. 37-41.

REFERENCES

1. Saranchuk V.I., Recun V.V. and Tamko V.A.. (1981), “Ways to improve the effectiveness of dust suppression by irrigation”, *Coal of Ukraine*, no. 9, pp. 33-34.

2. Medvedev E.N., Korenev A.P. and Sklyarov L.I.. (1983), “Improvement of dust removal methods for shielding of steep layers”, *Coal of Ukraine*, no. 2, P. 26-27.

3. Maltsev V.L., Kashuba O.I. and Gamza N.A.. (2002), “New wetting agent for combating coal dust”, *Coal of Ukraine*, №1, P. 29.

4. Kozlyuk A.I. (1979), *Vodosnabzhenie ugolnykh zhakht dlya borby s pozharami I pylyu* [Water supply to coal mines for fighting fires and dust], Nedra, Moscow, SU.

5. Ischuk I.G. and Pozdnyakov G.A.. (1991), Sredstva kompleksnogo obespylivaniya gornykh predpriyatiy [Means of complex dusting of mining enterprises], Nedra, Moscow, SU.

6. Fon Felzen-Tservek V. (1991), “Ways to increase the level of security in the coal industry”, *Glukauf (Rus. Trans.)*, no. 17/18, pp. 6-19.

7. Kudryashov R.R., Voronina L.D., Shurinova M.K., Voronina Yu.V. and Bolshakov V.A. (1979), *Smachivaniye pyli I kontrol zapylennosti vozdukha v shakhtakh* [Dust wetting and dust control in mines], Nauka, Moscow, SU.

8. Saranchuk V.I., Kachan V/N/, Rekun V.V. et al. (1984), *Fiziko-khimicheskie osnovy gidroobespylivaniya I preduprezhdeniya vzryvov ugolnoy pyli* [Physicochemical bases of hydro-dusting and prevention of coal dust explosions], Naukova Dumka, Kyiv, SU.

9. Zhuravlev V.P., Tsytsura A.A., Kudryavtsev A.A. The use of water dedusting at the enterprises of ferrous metallurgy and in the mining industry. - Karaganda, 1982.- 22 s

10. Koshuba O.I. (2000), “MakSRI work in the field of mine dust control”, *Ways and means of creating safe and healthy working conditions in coal mines: collection of scientific proceedings*, MakSRI, pp. 37-41.

Про автора

Горобей Марина Сергіївна, магістр, старший науковий співробітник ТОВ «Науковий Парк «Чорнобиль» Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління, Київ, Україна, marina.gorobey@gmail.com

About the author

Horobei Maryna Serhiivna, Master of Science, Senior Researcher at Scientific Park Chornobyl of State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, Ukraine, marina.gorobey@gmail.com

---

Аннотация. В результате функционирования вентиляционных систем угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в атмосферу выбрасываются значительные объемы карбонсодержащей пыли. Выброшенная в атмосферу грубодисперсная пыль интенсивно оседает в пределах санитарно-защитных зон шахт. Тонкодисперсная пыль выносится за ее пределы, загрязняя окружающую среду на расстоянии до 3500 м от угольной шахты. Загрязнение атмосферного воздуха и изменение экологических параметров имеют медленный, накопительный эффект неблагоприятных последствий, проявляющийся через много десятилетий. Это приводит к нарушению экосистемы и угрожает здоровью человека. Карбонсодержащая пыль опасна как сама по себе, так и как транспортер в организм человека и животных вредных и отравляющих веществ, которые оседают на тонкодисперсных частицах угля. Экологическая опасность выбросов карбонсодержащей пыли обуславливает необходимость проведения мероприятий по обеспыливанию шахтных вентиляционных потоков и снижению выбросов пыли в атмосферу.

В статье приведены результаты исследований процесса пылеподавления взвешенной в воздухе карбонсодержащей пыли с помощью распыленной воды, с учетом действия гравитационных и статических полей. В качестве исходных данных в работе были использованы результаты работ МакНИИ, полученные при проведении экспериментов по гидрообеспыливанию на лабораторном стенде в электростатическом поле. Было установлено, что в активной зоне действия факела эффективность подавления пыли определяется величиной вектора скорости капель жидкости. За пределами активной зоны эта эффективность определяется величиной скорости падения капель и электростатическими силами. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют раскрыть механизм взаимодействия распыленной жидкости с карбонсодержащей пылью в гравитационном и электростатическом полях и могут быть использованы при разработке новых эффективных средств пылеподавления.

Ключевые слова: карбонсодержащая пыль, гравитационные поля, электростатические поля, пылеподавление, турбулентный режим

Annotation. As a result of the functioning of ventilation systems in the coal mining and coal processing enterprises, significant volumes of carbon dust deposits are emitted into the atmosphere. Coarse dust emitted into the atmosphere intensively settles within the sanitary protection zones of the mines. Fine dust is carried outside the sanitary protection zone of mine polluting the environment at a distance of up to 3500 m from the coal mine. Air pollution and changing

environmental parameters are slow, cumulative effect of adverse effects, which manifests itself through the decades. This leads to disruption ecosystems and threatens human health. Carbon-containing dust is dangerous as itself and as a transporter to the human and animal organism of harmful and poisonous substances that settle on fine particles of coal dust. The environmental risk of carbon-containing dust emissions necessitates measures for dedusting the mine ventilation streams and reduce dust emissions to the atmosphere. The article presents the results of research of the dust suppression process of airborne carbon-containing dust using sputtered fine water, taking into account the action of gravitational and static fields. As initial data in the work were used the results of Makeevka Research Institute, obtained during the experiments on hydropower at the laboratory stand in an electrostatic field. It was found that in the active area of the nozzle the effectiveness of dust suppression is determined by the magnitude of the velocity vector of the droplets of liquid. Outside the core, this efficiency is determined by the drop rate and the electrical forces. It is shown that the results of accounts well coincide with experimental data. The results obtained reveal the mechanism of interaction of the sprayed liquid with carbon-containing dust in gravity and electrostatic fields and can be used in the development of new effective means of dust suppression.

Keywords: carbon dust, gravity fields, electrostatic fields, dust suppression, turbulent mode

Стаття надійшла до редакції 20.11. 2018
Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Т.В. Бунько