

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПИЛОВИХ ПОТОКІВ У ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ І РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ ДИСПЕРГОВАНОЇ РІДИНИ З ЗАВИСЛИМ У ПОВІТРІ КАРБОНОВМІСНИМ ПИЛОМ

¹Горобей М. С.

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ СО ВЗВЕШЕННОЙ В ВОЗДУХЕ КАРБОНСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛЬЮ

¹Горобей М. С.

¹Государственная экологическая академия последипломного образования и управления

THEORETICAL RESEARCH OF DYNAMICS OF DUST FLOWS IN UNDERGROUND WORKINGS AND DEVELOPMENT OF A PHYSICAL MODEL FOR INTERACTION BETWEEN DISPERSED LIQUIDS AND CARBON-CONTAINING DUSTSUSPENDED IN THE AIR

¹Horobei M.S.

¹State Environmental Academy of Postgraduate Education and Management

Анотація. Екологічна небезпека викидів карбоновмісного пилу зумовлює необхідність проведення заходів щодо знепилювання шахтних вентиляційних потоків і зниження викидів пилу до атмосфери. Аналіз розглянутих фахових літературних джерел показав, що у теперішній час відсутні теоретичні роботи з питання вивчення механізму захвату зваженого карбоновмісного пилу диспергованими водними струменями. Відсутня фізична модель процесу. Дослідження механізму захоплення завислого у повітрі карбоновмісного пилу і диспергованої рідини у вентиляційному потоці є важливою науково-практичною задачею, яка неможлива без розгляду динаміки пилових і диспергованих водних потоків. На основі відомих теоретичних і експериментальних даних взаємодії диспергованої рідини із завислим у повітрі пилом уточнений механізм захоплення зваженого вугільного пилу краплями рідини у вентиляційному потоці: частки пилу не повинні обов'язково змочуватися і занурюватися до крапельної рідини. Цього може і не бути при природній і примусовій зарядженості пилового і диспергованого водного потоків. Потрапляючи до сфери впливу електростатичних сил, частки прямують до крапель, доки не впадуть на ґрунт виробки, не встигаючи коагулюватися. Після потрапляння часток карбоновмісного пилу на мокрий ґрунт ефект знепилення вентиляційного потоку буде досягнутий. Доведено, що рух часток пилу і крапель рідини буде переходити від турбулентного режиму до ламінарного, захоплюючи і перехідний режим. Тому розгляд тільки ламінарного режиму з використанням закону Стокса, як у роботах попередників, може призвести до грубих помилок. Дослідження показали, що користуватися законом Стокса при оцінці вертикальної швидкості руху можна тільки при діаметрах часток чи крапель менших 200 мкм. Також не можна користуватися законом Стокса для повздовжньої швидкості в активній зоні дії факелу, де локальні числа Рейнольдса можуть сягати декілька тисяч. Отримані результати дозволяють розкрити механізм взаємодії розпиленої рідини з вугільним пилом і можуть бути використані при розробці нових ефективних засобів боротьби з карбоновмісним пилом.

Ключові слова: карбоновмісний пил, пилоподавлення, дисперговані водні струмені, ламінарний режим, турбулентний режим.

Під час вивчення динаміки пилових і диспергованих водних струменів, аналогічно [1], будемо вважати частки пилу і краплі рідини як окремі об'єкти, які рухаються у вентиляційному потоці.

Оберемо вісі координат (рис.1): x - повздовжна координата за рухом вентиляційного потоку з початком від місця створення пилового потоку (розташування комбайну) чи від місця розташування водяного факелу, y - поперечна координата знизу доверху з початком біля ґрунту виробки.

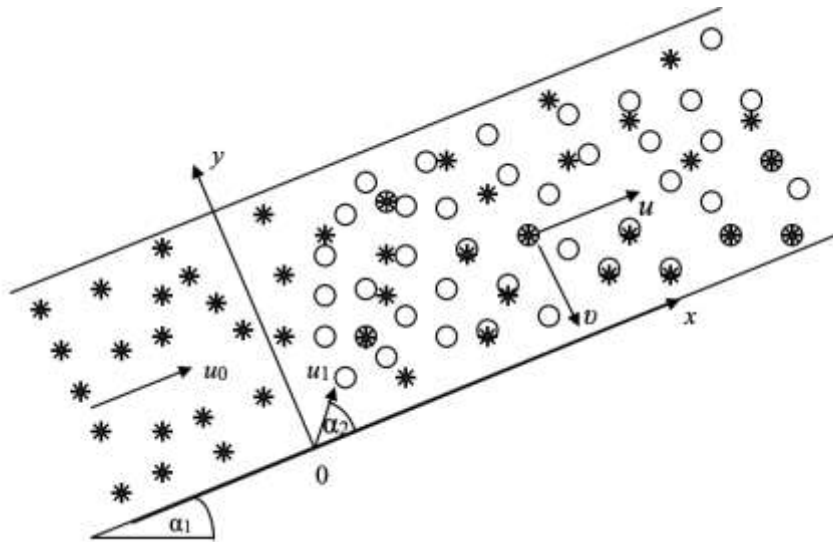


Рисунок 1 - Схема руху і механічної взаємодії розпиленої рідини (кружечки) з карбоновим пилом (зірочки) у похилій виробці

Рівняння руху твердого чи рідкого тіла у полі сили тяжіння, має вигляд [2]

$$m_i \frac{d\vec{U}}{dt} = m_i \vec{g} - \vec{W} \quad (1)$$

де m_i - маса i - ї частки пилу чи краплі рідини, кг; \vec{U} - вектор відносної швидкості руху частки чи краплі, м/с; t - час з моменту початку політу частки чи краплі, с; \vec{g} - прискорення сили тяжіння, м/с²; \vec{W} - сила опору руху часток чи крапель, Н.

У проекціях на вісі координат рівняння руху частинок пилу або крапель рідини представимо у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= -g \sin \alpha_1 - \frac{6}{\rho \pi d_i^3} W_x; \\ \frac{dv}{dt} &= -g \cos \alpha_1 - \frac{6}{\rho \pi d_i^3} W_y \end{aligned} \quad (2)$$

де u, v - проекції вектора швидкості на вісі координат, м/с; g - прискорення сили тяжіння (приймається рівним 9,81 м/с²); α_1 - кут нахилу виробки до горизонту, град; ρ - щільність частки або краплі (зазвичай приймається рівною 1300 кг/м³ - для часток вугільного пилу і рівною 1000 кг/м³ - для води); d_i - діаметр i - тої частки або краплі, м; W_x, W_y - проекції вектора сили опору руху, Н

Вважається, що сили опору руху тіла в повітрі пропорційні кінетичній енергії відносного руху і площі миделевого перетину тіла [3]. У векторній формі ця залежність може бути представлена у вигляді

$$\vec{W} = c_n \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{\rho_0 |U| \vec{U}}{2}, \quad (3)$$

де c_n – коефіцієнт опору, який залежить від швидкості і діаметру часток чи крапель; ρ_0 – щільність повітря, кг/м³.

Для відносного руху у потоці повітря формула (3) у проєкціях на вісі координат з урахуванням знаку напрямку руху (за потоком чи проти нього) прийме вигляд:

$$W_x = c_x \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{\rho_0 |u \pm u_0| (u \pm u_0)}{2};$$

$$W_y = c_y \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{\rho_0 |v| v}{2}, \quad (4)$$

де c_x, c_y – проєкції коефіцієнту опору на вісі координат; u_0 – швидкість вентиляційного потоку, м/с.

Підставляючи вираз (4) до системи рівнянь (2), отримаємо

$$\frac{du}{dt} = -g \sin \alpha - \frac{3\rho_0 c_x}{4\rho d_i} |u \pm u_0| (u \pm u_0);$$

$$\frac{dv}{dt} = -g \cos \alpha - \frac{3\rho_0 c_y}{4\rho d_i} |v| v \quad (5)$$

Додамо до рівнянь системи (5) початкові умови, виходячи з того, що частки чи краплі у місці їх утворення набувають під кутом нахилу до ґрунту виробки швидкість, яка не збігається зі швидкістю повітря:

$$1) u(0) = u_1 \cos \alpha_2; \quad 2) v(0) = u_1 \sin \alpha_2 \quad (6)$$

де u_1 – початкова швидкість руху часток пилу чи крапель рідини, м/с; α_2 – кут нахилу початкової швидкості руху часток чи крапель до ґрунту виробки, град.

Багаточисельні експериментальні дослідження [3] показують, що коефіцієнт супротиву шаровидної форми підкорюється двучленному закону і може бути з достатнім ступенем точності прийнятий рівним

$$c_n = 0,5 + \frac{24\nu}{|U|d_i} \quad (7)$$

На рис. 2 наведена розрахункова крива (7) і експериментальні дані [3] залежності коефіцієнту опору руху тіл шаровидної форми від локального числа Рейнольдса при переході від ламінарного режиму до турбулентного.

Під локальним числом Рейнольдса [1] мається на увазі відношення динамічних сил частки пилу або краплі рідини до сил в'язкості повітря

$$\text{Re}_x = \frac{|u - u_0|d_i}{\nu}; \quad \text{Re}_y = \frac{|v|d_i}{\nu} \quad (8)$$

Максимальна похибка розрахункових даних, як показали порівняння з експериментальними даними, не перевищує 10–20%. З аналізу можливих значень локального числа Рейнольдса виходить, що він може змінюватися у широких межах. Так, приймаючи мінімальний діаметр $d_{min} = 1$ мкм і мінімальну швидкість $u_{min} = 0,1$ м/с, отримуємо $\text{Re} = 0,007$. А приймаючи максимальний діаметр $d_{max} = 1000$ мкм і максимальну швидкість $u_{min} = 100$ м/с [2], отримуємо $\text{Re} = 6667$.

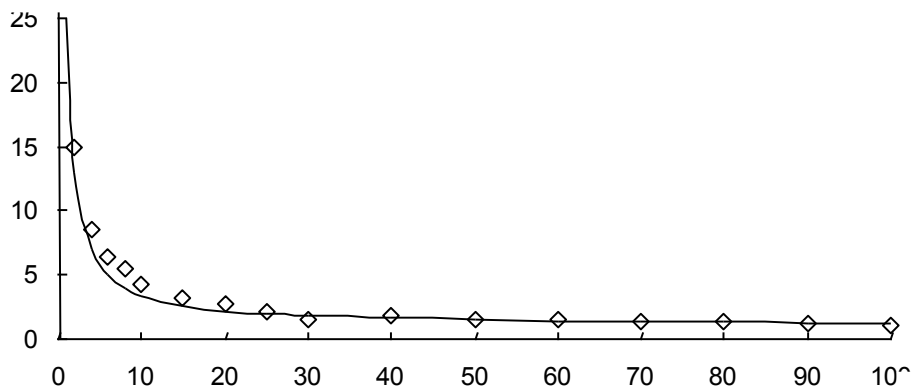


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта опору руху тіл шаровидної форми від локального числа Рейнольдса під час переходу від ламінарного режиму до турбулентного режиму

Таким чином, рух часток пилу і крапель рідини буде переходити від турбулентного режиму до ламінарного, захоплюючи і перехідний режим. Тому розгляд тільки ламінарного режиму з використанням закону Стокса, як в роботах [4, 5], може привести до грубих помилок.

Вирішуючи алгебраїчні рівняння другого порядку [6, 7], знайдемо граничне значення проєкцій швидкості

$$u_2 = \mp u_0 - \frac{2g \sin \alpha_1}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4a_2g \sin \alpha_1}}; \quad (9)$$

$$v_2 = \frac{-2g \cos \alpha_1}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4a_2g \cos \alpha_1}}$$

З формули (9) виходить, що при $a_2 = 0$ режим руху ламінарний, а при $a_1 = 0$ – турбулентний.

На рис. 3 представлена залежність граничної вертикальної швидкості від діаметру часток чи крапель, встановлена за другою формулою (9). З рис. 2.3 виходить, що користуватися законом Стокса при оцінці вертикальної швидкості руху можна тільки при діаметрах часток чи крапель менших 200 мкм. Так, важко повірити, що крапля діаметром 0,5 мм рухалась зі швидкістю 7 м/с. З

урахуванням турбулентності потоку її швидкість буде складати згідно рис. 2.3 всього 2,5 м/с.

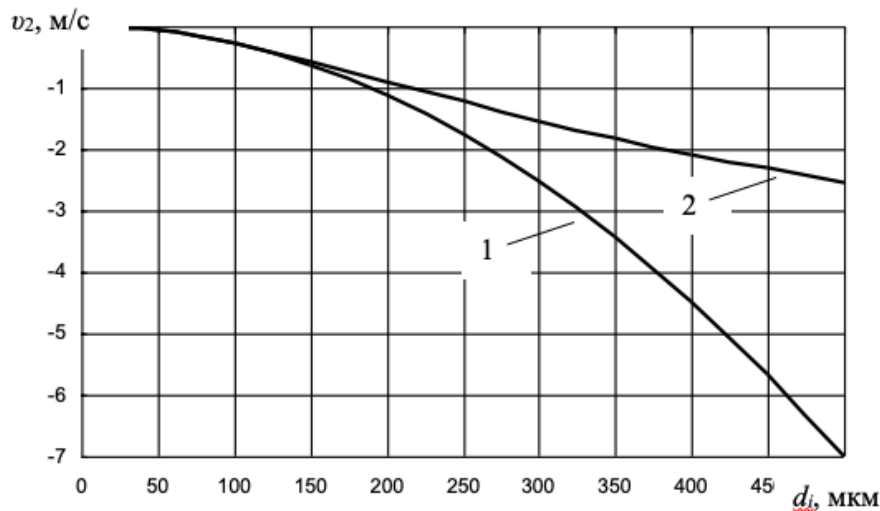


Рисунок 3 - Залежність граничної вертикальної швидкості руху частки чи краплі від її діаметру під час ламінарного (крива 1) і змішаного режимів (крива 2)

Тим більше не можна користуватися законом Стокса для повздовжної швидкості в активній зоні дії факелу, де локальні числа Рейнольдса, як уже відмічалось, можуть складати декілька тисяч.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Журавлёв В.П., Глузберг Б.Е. Выбор способа орошения для пылеподавления. // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. Научн.-техн. реф. Сб. – ЦНИЭИуголь, 1979, №3. – С. 2 – 3
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967. 428 с.
4. Поздняков Г. А., Марынюк Г.К. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях. М.: Недра, 1983. 126 с.
5. Шлихтинг Г..Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. –712 с.
6. Горобей М.С., Булгаков Ю.Ф., Шайхлисламова И.А., Алексеенко С.А.. Розробка математичної моделі аеродинамічної взаємодії розпиленої води з частинками вугільного пилу. // Розробка родовищ: 36. наук. пр. 2015. Т. 9. С. 443-449.
7. Горобей М.С., Булгаков Ю.Ф. Теоретическое исследование процесса осаждения угольной пыли в гравитационных и электростатических полях. // Вісті Донецького гірничого інституту. 2014. № 2(34). С. 210-215

REFERENCES

1. Kudryashov R.R., Voronina L.D., Shurinova M.K., Voronina Yu.V. and Bolshakov V.A. (1979), *Smachivaniye pyli i kontrol zapylennosti vozdukhа v shakhtakh* [Dust wetting and dust control in mines], Nauka, Moscow, SU.
2. Zhuravlev V.P. and Gluzberg B.E. (1979), "The choice of irrigation method for dust suppression", *Tekhnika bezopasnosti, okhrana truda i gornospasatelnoe delo*, no. 3. pp. 2 – 3.
3. Sedov L.I. (1967), *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and Dimension Methods in Mechanics], :Nauka, Moscow, SU.
4. Pozdnyakov G.A. and Martynyuk G.K. (1983), *Teoriya i praktika borby s pylyu v mekhanizirovannykh podgotovitelnykh zaboyakh* [Theory and practice of dust control in mechanized preparatory faces], : Nedra, Moscow, SU.
5. Shlikhting G. (1974), *Teoriya pogranichnogo sloya* [Boundary layer theory], Nauka, Moscow, SU.
6. Gorobei M.S., Bulgakov Yu.F., Shaykhlislamova I.A. and Alekseenko S.A. (2015), "Development of mathematical model for aerodynamic interference of sprayed water with coal dust particles", *Rozrobka of rodovyshch*, Vol. 9, pp. 443-449.
7. Gorobei M.S. and Bulgakov Yu.F. (2014), "Theoretical study of the process of coal dust deposition in gravitational and electrostatic fields", *Visti Donetskogo gimnychogo Instytutu*, no. 2 (34), pp. 210-215.

Про автора

Горобей Марина Сергіївна, магістр, старший науковий співробітник, ТОВ «Науковий Парк «Чорнобиль» Державного закладу Державна екологічна академія 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 State Institution State Environmental Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, Ukraine, marina.gorobey@gmail.com

Аннотация Экологическая опасность выбросов карбонсодержащей пыли обуславливает необходимость проведения мероприятий по обеспыливанию шахтных вентиляционных потоков и снижению выбросов пыли в атмосферу. Анализ рассмотренных профессиональных литературных источников показал, что в настоящее время отсутствуют теоретические работы по вопросу изучения механизма захвата взвешенной карбонсодержащей пыли диспергированными водными струями. Отсутствует физическая модель процесса. Исследование механизма захвата взвешенной в воздухе карбонсодержащей пыли и диспергированной жидкости в вентиляционном потоке является важной научно-практической задачей, которая невозможна без рассмотрения динамики пылевых и диспергированных водных потоков. На основе известных теоретических и экспериментальных данных взаимодействия диспергированной жидкости с взвешенным в воздухе пылью уточнен механизм захвата взвешенной угольной пыли каплями жидкости в вентиляционном потоке: частицы пыли не должны обязательно смачиваться и погружаться в капельной жидкости. Этого может и не быть при естественной и принудительной заряженности пылевого и диспергированного водного потоков. Попадая в сферу влияния электростатических сил, частицы устремляются к каплям, пока не упадут на почву выработки, не успев коагулироваться. После попадания частиц карбонсодержащей пыли на мокрый грунт эффект обеспыливания вентиляционного потока будет достигнут. Доказано, что движение частиц пыли и капель жидкости будет переходить от турбулентного режима к ламинарному, захватывая и переходный режим. Поэтому рассмотрение только ламинарного режима с использованием закона Стокса, как в работах предшественников, может привести к грубым ошибкам. Исследования показали, что пользоваться законом Стокса при оценке вертикальной скорости движения можно только при диаметрах частиц или капель меньших 200 мкм. Тем более нельзя пользоваться законом Стокса для продольной скорости в активной зоне действия факела, где локальные числа Рейнольдса, могут составлять несколько тысяч. Полученные результаты позволяют раскрыть механизм взаимодействия распыленной жидкости с угольной пылью и могут быть использованы при разработке новых эффективных средств борьбы с карбонсодержащей пылью.

Ключевые слова: карбонсодержащая пыль, пылеподавление, диспергированные водные потоки, ламинарный режим, турбулентный режим.

Abstract. The environmental risk of carbon-containing dust emissions necessitates undertaking measures for dedusting the mine ventilation air streams and reducing dust emissions to the atmosphere. An analysis of the reviewed professional literature sources has shown that today, there is no theoretical works covering mechanism of capturing suspended carbon-containing dust by the dispersed water jets. There is also no physical model of this process. Research of mechanism of capturing carbon-containing dust suspended in air and dispersed liquid in the ventilation flow is an important scientific and practical task, which can not be solved without considering dynamics of dust and dispersed water flows. Taking the known theoretical and experimental data on interaction between dispersed liquid and carbon-containing dust suspended in air as a base, mechanism for capturing suspended coal dust by liquid droplets in the ventilation stream is now understood more exactly: dust particles do not have to be wetted and immersed in a droplet liquid, for example, in case of natural and forced charge of dust and dispersed water flows. Having occurred in the area under the effect of electrostatic forces, particles move to droplets until falling on the roadway soil and before being coagulated. When the particles of carbon-containing dust get the wet soil, effect of the ventilation flow dedusting starts. It is proved that motion of dust particles and liquid droplets passes from the turbulent regime to the laminar one and partially captures the transition regime. Therefore, consideration of laminar regime only by the Stokes law, as it is in the works of predecessors, can lead to gross errors. Researchs have shown that the Stokes law can be used for estimating vertical speed of motion only in case of particle or droplet diameters smaller than 200 microns. Moreover, one cannot use the Stokes law for the longitudinal velocity in the core of the torch, where the local Reynolds numbers can amount several thousand. The results obtained allow revealing mechanism of interaction between the atomized liquid and coal dust and can be used in designing of new effective means for removing suppression carbon-containing dust.

Keywords: carbon dust, dust suppression, dispersed water flows, laminar regime, turbulent regime.

Стаття надійшла до редакції 17.09. 2018.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Т.В. Бунько