Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции

Николай Петрович КОСАРЕВ*

Владимир Николаевич МАКАРОВ**

Александр Владимирович УГОЛЬНИКОВ***

Николай Владимирович МАКАРОВ****

Герман Петрович ДЫЛДИН*****

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Наиболее популярным методом осаждения пыли из воздуха с целью локализации взрывов является пылеподавление. Совершенствование системы локализации вероятных взрывов угольной пыли – составная часть проблемы пылевзрывозащиты горных предприятий, решение которой является одной из важнейших задач в области техники безопасности и охраны труда.

Цель: исследование физики процесса и построение математической модели движения аэрозолей в горных выработках в широком диапазоне изменений инерционных кинематических параметров воздушного потока.

Методика исследований. На базе уравнения Буссинеска, правила Фурье и π -теоремы о подобии сложных систем, аналогии дисперсии завихренности и кинематической вязкости построена математическая модель движения пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции, получены критерии подобия, обеспечивающие идентичность экспериментальных исследований и реальных аэрологических процессов в шахтах, критериальные уравнения для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления и времени неустановившегося инерционного надстоксовского движения.

Результаты. Получены уравнения, позволяющие идентифицировать через критерии Рейнольдса, Эйлера и Архимеда аэродинамические процессы движения аэрозолей при гидровихревом пылеподавлении, соответствующие надстоксовскому и стоксовскому режимам течения. Подтверждена возможность снижения до 20 % аэродинамического сопротивления при гидровихревой коагуляции, что позволяет повысить до 15 % энергоэффективность пылеподавления и не менее чем на 20 % увеличить коэффициент турбулизации, снижая тем самым вероятность возникновения опасной концентрации пылевых аэрозолей.

Область применения. Использование предложенной математической модели позволит более качественно рассчитывать локальные аэрологические процессы в горных выработках и, как следствие, повысить эффективность управления процессом турбулизации и пылеподавления на горных предприятиях.

Ключевые слова: аэрология, гидровихревая коагуляция, критерии подобия, инерционные кинематические параметры, коэффициент турбулизации, пылевые аэрозоли, пылеулавливание.

Введение

Внедрение инновационных технологий, обеспечивающих эффективную добычу и переработку минерального сырья, сдерживает несовершенство систем пылеподавления и локализации взрывов угольной пыли. Взрывы аэрозолей и пыли имеют существенные различия, однако взрывчатые свойства аэрозолей и пыли имеют много общего, что делает возможным разработку комплексных методов снижения газовой и пылевой опасностей выемочных участков на горных предприятиях [1, 2].

Мероприятия обеспечения пылевого режима в шахтах основаны на недопущении взрывоопасных скоплений пыли и предотвращении появления источника высокой температуры, способного воспламенить пылевые аэрозоли. Наибольшую актуальность проблема взрыва пылегазовых смесей представляет для газообильных угольных шахт, в первую очередь для подготовительных забоев, в которых происходит более половины аварий. Исследования показывают, что более 60 % случаев образования взрывоопасной среды могут быть исключены при эффективном пылеподавлении.

✉ iuggu-journal@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0128-5859>

** uk.intelnedra@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>

*** ugolnikov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8442-4841>

**** mnikolay84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

***** German.Dyldin@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

Наиболее распространенным способом осаждения пыли из воздуха для локализации взрывов является пылеподавление, основанное на смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием при этом гетерокоагуляционной системы «капля-пылинка», которая выпадает из воздуха и осаждается на поверхности [3, 4].

Совершенствование системы локализации вероятных взрывов угольной пыли – составная часть проблемы пылевзрывозащиты горных предприятий, решение которой является одной из важнейших задач в области техники безопасности и охраны труда на ближайшие годы.

В статьях [5, 6] предложена модель гидровихревого инерционного пылеподавления, исследован механизм инерционной, ортокинетической гидровихревой коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости.

Динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости при высоконапорном гидровихревом пылеподавлении играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды. Однако присоединенный вихрь, возникающий в результате интенсивного вращения аэрозолей, влияет на аэрологию соответствующего участка горной выработки, где осуществляется гидровихревое пылеподавление, изменяя процесс перемешивания масс воздуха и пыли и соответственно коэффициент турбулизации.

Актуальность совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания, внедрения инновационной техники локализации взрывов потребовала нового подхода к построению математической модели гидровихревого, инерционного, кинетического движения пылевого аэрозоля в горной выработке.

В процессе пылеподавления переходные газодинамические явления в выработках, вызванные резкими изменениями распределения энергии депрессий в процессе гидровихревого пылеподавления, существенно влияют на общие параметры концентрации пылевых аэрозолей атмосфере шахты. Указанное может приводить к негативным последствиям возникновения застойных зон, нежелательных обратных и вихревых течений, снижению обеспыливающей эффективности вентиляции в целом. Исследования энергетического взаимодействия системы «капля жидкости-частица пыли» в процессе гидровихревой коагуляции с потоком воздуха и пыли, движущимся по горной выработке, актуальны и необходимы для повышения эффективности пылеподавления, вентиляции и процесса турбулизации [7].

Целью данной статьи является составление уравнений аэрологии пылевых аэрозолей при гидровихревой коагуляции на базе уравнения Буссинеска, правила Фурье и π -теоремы о подобии сложных систем, аналогии дисперсии завихренности и кинематической вязкости для повышения качества расчетов локальных аэрологических процессов в горных выработках, эффективности пылеподавления и управления процессом турбулизации.

Методы исследований основаны на научно обоснованной и экспериментально подтвержденной гипотезе об определяющем влиянии на распределение пылевых аэрозолей инерционного неустановившегося гидровихревого процесса движения вращающихся капель жидкости, формирующих устойчивые присоединенные вихри.

Методология исследований

Для построения системы уравнений движения взрывоопасных пылевых аэрозолей введем понятия приведенных аэродинамического диаметра и плотности пылевых аэрозолей, представив их в виде:

$$d_{\Sigma} = \frac{6\sqrt{\frac{\pi}{6}(d_{\text{ж}}^3 + d_{\text{ч}}^3)}}{\pi}; \rho_{\Sigma} = \frac{d_{\text{ж}}^3 \rho_{\text{ж}} + d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}}{d_{\text{ж}}^3 + d_{\text{ч}}^3}. \quad (1)$$

где $d_{\text{ж}}$ – диаметр капли жидкости, м; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы пыли, м.

Для построения критериальных уравнений движения пылевых аэрозолей введем критерии гидровихревой инерции и аэрационного витания частиц в виде:

$$k_{ri} = \frac{F_{ri}}{F_{Ai}} = \frac{F_i \cos \alpha_i}{F_{Ai}}; k_{zi} = F_{\text{Жи}} - F_{Ai} - F_{Ci} + F_{Mi} + F_i \cos \alpha_i, \quad (2)$$

где F_{ri} – сила сопротивления движению пылевых аэрозолей в горной выработке, $F_{ri} = k_i \frac{\pi}{4} d_{\Sigma i}^2 \rho_{\Sigma} v_{\Sigma i}^2$; k_i – коэффициент сопротивления i -й частицы аэрозоля; $d_{\Sigma i}$ – приведенный аэродинамический диаметр i -й частицы, м; ρ_{Σ} – плотность газа, кг/м³; $v_{\Sigma i}$ – скорость i -й частицы аэрозоля, м/с; $F_{\text{Жи}}$ – подъемная сила Жуковского, направленная вверх, $F_{\text{Жи}} = \frac{1}{4} c_i \pi d_{\Sigma i}^2 \rho_{\Sigma} (v_{ri} - U_r)^2$; F_{Ai} – сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i -ю частицу аэрозоля, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{Ai} = \frac{1}{6} \pi d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g$; F_{Ci} – сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами частиц аэрозоля, $F_{Ci} = \frac{\varphi_i}{2} \mu_r \pi d_{\Sigma i} v_{zi}$; F_{Mi} – сила Магнуса направление которой определяется угловой скоростью вращения частицы аэрозоля и скорости движения воздуха в горной выработке, $F_{Mi} = \frac{\pi}{8} \rho_r d_{\Sigma i}^3 \omega_{\Sigma i} U_{\omega}$; v_{zi} – вертикальная составляющая скорости i -й частицы, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ_i – коэффициент

Рис. 1. Траектория движения пылевого аэрозоля и действующие на него силы в условиях гидровихревого пылеподавления:
1 – неустановившееся надстоксовское инерционное движение, $v \gg U$; 2 – стоксовское движение под действием силы Архимеда, $v \geq U$.
Figure 1. The trajectory of the dust aerosol movement and the forces acting on it under conditions of hydro-cyclone dust suppression:
1 – unsteady over-Stokes inertial motion, $v \gg U$; 2 – Stokes motion under the action of the Archimedes force, $v \geq U$.

формы i -й частицы аэрозоля в законе Стокса; $\omega_{\Sigma i}$ – угловая скорость вращения i -й частицы аэрозоля, с^{-1} ; μ – коэффициент динамической вязкости воздуха, $\text{кг}/(\text{м} \times \text{с})$; U_{ω} – нормальная составляющая скорости движения воздуха в горной выработке по отношению к вектору углового вращения частицы аэрозоля, $\text{м}/\text{с}$.

Указанные индикаторы удовлетворяют требованиям критериев подобия и определяют инерционные перегрузки частиц аэрозоля, движущихся в горной выработке под действием инерционных сил в условиях гидровихревого пылеподавления и скорости перемещения воздуха.

Индикаторы гидровихревой инерции и аэрационного витания частиц аэрозолей по формулам (2) рассчитаны с учетом того, что гидровихревые силы инерции неустановившегося движения частиц аэрозолей существенно больше инерционных сил поступательного движения воздуха в горной выработке.

Уравнение движения i -й частицы аэрозоля в проекции на ось $0r$ горной выработки в соответствии с классическим уравнением Ньютона и с учетом рис. 1 запишем в виде:

$$m_i = \frac{\partial v_{ri}}{\partial t} = -F_{ri} = F_i \cos \alpha_i. \quad (3)$$

Уравнение движения i -й частицы аэрозоля в проекции на ось Oz имеет вид:

$$m_i = \frac{\partial v_{zi}}{\partial t} = F_{\mathcal{K}i} - F_{Ai} - F_{Ci} - F_i \sin \alpha i + F_{Mi}. \quad (4)$$

В условиях гидровихревого подавления траектория движения частиц аэрозолей имеет пространственный характер, вращаясь вокруг вектора поступательной скорости движения.

Для перехода от пространственной модели вращательного движения аэрозолей к плоской воспользуемся уравнением Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости, приведенное в [8, 9], которое преобразуем в виде:

$$\frac{\partial \omega_{\Sigma i}}{\partial t} = -(\omega_{\Sigma i} \nabla) v_{\Sigma i} = \frac{\mu_r}{\rho_r} \nabla^2 \omega_{\Sigma i}, \quad (5)$$

где $\omega_{\Sigma i} = \text{rot } v_{\Sigma i}$.

Правая часть уравнения (5) представляет собой дисперсию завихренности, т. е. фактически отражает процесс передачи энергии вращения капли аэрозоля газу горной выработки, совместно с которым она перемещается. При этом коэффициент дисперсии завихренности представляет собой кинематический коэффициент вязкости μ_r/ρ_r и влияет на коэффициент аэродинамического сопротивления посредством числа Рейнольдса. Указанное подтверждает тождественность

влияния вязкости и дисперсии завихренности на взаимодействие частиц аэрозоля с газовой средой горной выработки, в которой движутся пылевые аэрозоли в условиях гидровихревого пылеподавления.

Таким образом, с достаточной точностью процесс движения взрывоопасных аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции можно рассматривать как плоское движение с учетом дополнительного влияния дисперсии завихренности на энергетические характеристики взаимодействия частиц аэрозоля с газовой атмосферой горной выработки.

С учетом изложенного уравнение (5) в полярных координатах может быть представлено в виде:

$$\frac{\mu_r}{\rho_r} \left(\frac{\partial^2 \omega_{\Sigma i}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_{\Sigma i}}{\partial r} \right) = \frac{\partial \omega_{\Sigma i}}{\partial t}. \quad (6)$$

Полученное уравнение тождественно уравнению распространения тепла, что подтверждает обоснованность выше указанного упрощения.

Следовательно, изменение циркуляции присоединенного вихря во времени при движении капли аэрозоля по траектории и индуцированная скорость, обусловленная диффузией завихренности и влиянием на процесс турбулизации воздуха в зоне вихревой коагуляции с учетом [10] получим в виде:

$$\Gamma_{\omega i} = \frac{\omega_{\Sigma i} d_{\Sigma i}^2 \rho_r}{16 \mu_r t_i} \exp \left(-\frac{\rho_r d_{\Sigma i}^2}{16 \mu_r t_i} \right); v_{\omega i} = \frac{\Gamma_{\omega i}}{\pi d_{\Sigma i}} \left(1 - \exp \left(-\frac{d_{\Sigma i}^2 \rho_r}{16 \mu_r t_i} \right) \right). \quad (7)$$

Из анализа уравнений (7) видно, что за период неустановившегося инерционного надстоксовского движения капли аэрозоля, при котором $v_{\Sigma i} > U$, гидровихревая инерционная коагуляция способствует дополнительной турбулизации газовой среды в горной выработке в области, прилегающей к зоне пылеподавления. При этом с учетом [11] время неустановившегося надстоксовского движения капли аэрозоля до скорости $v_{\Sigma i} = U$ в три раза превышает время релаксации в процессе гидровихревой коагуляции, т. е. $t_i = 3\tau_{\Sigma i}$.

Уравнения (3), (4) идентичны уравнению Буссинеска, описывающему гидродинамически неустановившийся режим инерционного движения частицы аэрозоля [12,13]:

$$\frac{\partial v_{\Sigma i}}{\partial t} = \frac{v_{\Sigma i}}{\tau_{\Sigma i}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \tau_{\Sigma i} = R \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{18 \mu_r}; R = k_i \frac{2 + 3\bar{\mu}}{3 + 3\bar{\mu}}; \bar{\mu} = \frac{\mu_{\Sigma}}{\mu_r}.$$

Уравнение Буссинеска позволяет определить время неустановившегося инерционного движения частицы аэрозоля в условиях гидровихревого пылеподавления, а главное, функционально связывает его с коэффициентом сопротивления k_i .

С учетом уравнений (2)–(4), (8) и положения В. А. Веникова о подобии сложных систем получим выражения для индикаторов гидровихревой инерции и аэрационного витания частиц аэрозоля при гидровихревом пылеподавлении на участках надстоксовского и стоксовского движения соответственно в виде [14]:

$$k_{ri} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r) d_{\Sigma i}}{\rho_r v_{\Sigma i}^2} \cdot \frac{\partial v_{ri}}{\partial t}; k_{zi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{k_i \rho_r U_r^2}{d_{\Sigma i} (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g}, \quad (9)$$

где $k_i = \frac{24}{\text{Re}_{\Sigma i}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления при установившемся стоксовском движении капли аэрозоля, т. е. значении $v_{ri} = U_r$;

$$k_{zi} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r) d_{\Sigma i}}{\rho_r v_{\Sigma i}^2} \cdot \frac{\partial v_{zi}}{\partial t}; k_{zi} = \frac{3}{4} \cdot \frac{U_{\omega}}{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r) g} \left(\rho_{\Sigma i} \omega_{\Sigma i} - \frac{2c_i \rho_r U}{d_{\Sigma i}} \right), \quad (10)$$

где $\omega_{\Sigma i} = \omega_{\omega i} \exp \left(-\frac{t_i}{\tau_{\Sigma i}} \right)$ при $t_i > 3\tau_{\Sigma i}$.

Критериальное уравнение направления вектора скорости движения частиц аэрозоля получим в виде:

$$\frac{k_{ri}}{k_{zi}} = \frac{\partial v_{ri}}{\partial v_{zi}}. \quad (11)$$

Экспериментально установлено, что сила аэродинамического сопротивления движению пылевому аэрозолю возрастает существенно нелинейно с ростом числа Рейнольдса на участке надстоксовского движения, в отличие от линейного

роста в условиях ее стоковоского движения т. е. при числах $Re < 1$. При этом одновременно нелинейно уменьшается время неустановившегося инерционного движения в условиях гидровихревого пылеподавления τ , что существенно усложняет нахождение его фактической величины, препятствуя тем самым использованию классических уравнений стоковоского движения.

Поскольку в уравнениях (3), (4) аэрогидродинамики капли аэрозоля только на участке траектории неустановившегося инерционного надстокоского движения коэффициент сопротивления газовой среды горной выработки k_i является существенно переменной величиной, установим его зависимость от физических величин, характеризующих аэрогидродинамический процесс инерционного движения капли аэрозоля под действием ускорения с начальной скоростью v_0 в форме безразмерного симплекса в условиях установившегося движения.

Уравнение зависимости коэффициента k_i от независимых переменных на участке надстокоского инерционного движения в виде безразмерной степенной зависимости запишем в виде:

$$k_i = C \mu_r^\alpha \rho_r^\beta \sqrt{v_{\Sigma i}^2 + 0,25 d_{\Sigma i}^2 \sin^2 \theta_{\Sigma i}^2} d_{\Sigma i}^\varepsilon \left(\frac{\partial v_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} \right)^f v_0^\psi \left(\frac{\partial v_{zi}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} \right)^\xi. \quad (12)$$

Для определения индикаторов подобия построим матрицу независимых размерностей и параметров:

$$\|M\| = \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} & \mu_r & \rho_r & \sqrt{v_{\Sigma i}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i}^2} & d_{\Sigma i} & \frac{\partial v_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} & v_0 & \frac{\partial v_{zi}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} \\ \hline M & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L & -1 & -3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ T & -1 & 0 & -1 & 0 & -2 & -1 & -2 \\ \hline & \alpha & \beta & \gamma & \varepsilon & f & \psi & \xi \end{array}. \quad (13)$$

Ранг матрицы $\|M\|$ равен трем. Следовательно, число независимых переменных, описывающих физический процесс установившегося движения аэрозолей в горной выработке, равно трем.

Число индикаторов подобия в соответствии с π -теоремой определяем по формуле:

$$K_\pi = N - M = 7 - 3 = 4,$$

где N – количество независимых размерных физических величин, характеризующих процесс аэрогидродинамического движения капли жидкости; M – количество независимых единиц размерности.

Показатели степени в уравнении (12) по составляющим матрицы (13) образуют однородную систему линейных уравнений, имеющих вид:

$$\begin{cases} \beta - \alpha = 0; \\ \gamma - \alpha - 3\beta + \varepsilon + f + \psi + \xi = 0; \\ -\alpha - \gamma - 2f - \psi - 2\xi = 0. \end{cases} \quad (14)$$

В соответствии с решением уравнений (14) матрица индикаторов подобия примет вид:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} & \mu_r & \rho_r & \sqrt{v_{\Sigma i}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i}^2} & d_{\Sigma i} & \frac{\partial v_{ri}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} & v_0 & \frac{\partial v_{zi}}{\partial t} \cdot \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r} \\ \hline \pi_1 & -2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -2 & 0 \\ \pi_3 & -2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ \pi_4 & -2 & 2 & 0 & 3 & 0 & 0 & 1 \end{array} = \pi_i. \quad (15)$$

Раскрывая определители матрицы (15), получим четыре индикатора подобия, описывающих физический процесс установившегося надстокоского движения капли аэрозоля в газовой среде в горной выработке при больших числах Рейнольдса:

$$\pi_1 = \frac{\rho_r (v_{\Sigma i}^2 + 0,25 \omega_{\Sigma i}^2 d_{\Sigma i}^2) d_{\Sigma i}^2}{\mu_r^2} = Re_{\Sigma i \omega i}^2; \pi_2 = \frac{P_i}{\rho_r v_{0i}^2} = \frac{\frac{\partial v_{ri}}{\partial t} d_{\Sigma i} (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\rho_r v_{0i}^2} = Eu_i;$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_r^2 v_{0i}^2 d_{\Sigma i}^2}{\mu_r^2} = \text{Re}_{0i}^2; \pi_4 = \frac{\rho_r d_{\Sigma i}^3 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r)}{\mu_r^2} \cdot \frac{\partial v_{\Sigma i}}{\partial t} = \text{Ar} d_{\Sigma i}^d. \quad (16)$$

Индикаторы подобия в формуле (16) представляют собой критерий Рейнольдса капли аэрозоля, критерий Эйлера, критерий Рейнольдса капли жидкости на выходе из установки пылеподавления и критерий Архимеда соответственно.

Таким образом, уравнение (12) в критериальной форме примет вид:

$$k_i = C (\text{Re}_{\Sigma i}^2)^a \text{Eu}_i^b (\text{Re}_{0i}^2)^c \text{Ar} d_{\Sigma i}^d. \quad (17)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности C и показатели степени a, b, c, d в выражении (17) определяем из уравнения установившегося движения капли аэрозоля в газовой среде с учетом уравнений (7), (8) и условия $U \ll v_{0i}$, которое запишем в виде:

$$m_i \frac{\partial v_{ri}}{\partial t} = \text{Eu}_i \rho_r v_{0i}^2 \frac{\pi d_{\Sigma i}^2}{4}. \quad (18)$$

С учетом уравнений (17), (18) получим соотношение, функционально связывающее между собой критерий Эйлера Eu_i и коэффициент аэродинамического сопротивления k_i при движении капли аэрозоля в газовой среде:

$$k_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\text{Eu}_i}{\text{Re}_{\Sigma i}^2 \text{Re}_{0i}^2}. \quad (19)$$

После соответствующих преобразований уравнений (17)–(19) относительно числа Рейнольдса получим выражение для определения времени неустановившегося инерционного движения капли аэрозоля до скорости $v_{\Sigma i} = U$ в виде:

$$\tau_{\Sigma i} = \frac{2}{9} \cdot \frac{d_{\Sigma i}^2 (\rho_{\Sigma i} - \rho_r) \text{Re}_{0i}^2}{\text{Eu}_i \mu_r \text{Re}_{\Sigma i}^2}. \quad (20)$$

Учитывая, что критерии Рейнольдса и Эйлера функционально связаны между собой, а главное, непрерывно и существенно изменяются по длине инерционного пробега капли аэрозоля в условиях надстоксовского режима, выражение для среднего значения критерия Эйлера с учетом [9] получим в виде:

$$\text{Eu}_{\text{ср}i} = \frac{6}{\text{Re}_{0i}} (1 + 0,07 \text{Re}_{0i}^{0,687}). \quad (21)$$

Учитывая соотношение между критерием Рейнольдса и коэффициентом аэродинамического сопротивления движению капли аэрозоля в газовой среде горной выработки, уравнение для среднего значения коэффициента сопротивления в уравнениях (3), (4) запишем в виде:

$$k_{\text{ср}i} = \frac{72}{\text{Re}_{0i}} (1 + 0,07 \text{Re}_{0i}^{0,687}). \quad (22)$$

После соответствующих преобразований получим выражение для среднего значения времени неустановившегося инерционного надстоксовского движения капли аэрозоля на первом этапе в горной выработке:

$$\tau_{\Sigma \text{ср}i} = K_{\tau} d_{\Sigma i}^2, \quad (23)$$

$$\text{где } K_{\tau} = 4 \frac{(\rho_{\Sigma i} - \rho_r) (1 + 0,07 \text{Re}_{0i}^{0,687}) (3 + 3\bar{\mu})}{\text{Re}_{0i} (2 + 3\bar{\mu}) \mu_r}.$$

Из уравнения (23) видно, что среднее время движения капель аэрозоля на первом этапе (рис. 1) является функцией квадрата диаметра капель аэрозоля, что позволяет использовать данный факт для увеличения зоны пылеподавления, т. е. повышения энергоэффективности гидровихревого пылеподавления, а главное, повышать коэффициент турбулентности воздуха в горной выработке, снижая тем самым вероятность формирования взрывоопасной концентрации пылевых аэрозолей.

Предложенный вариант поэтапного осреднения значений коэффициента сопротивления движению капли аэрозоля в газовой среде горной выработки и времени движения капли аэрозоля на первом этапе неустановившегося инерционного надстоксовского движения позволяет с достаточной степенью точности использовать уравнения классической аэрогидродинамики установившегося движения капли аэрозоля в диапазоне чисел Рейнольдса до 10^4 на длине ее инерционного пробега.

Рис. 2. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от угловой скорости вращения аэрозоля в условиях гидровихревой коагуляции: а – при $d_g = 4 \times 10^{-5}$ м: 1 – $v_0 = 10$ м/с; 2 – $v_0 = 20$ м/с; 3 – $v_0 = 30$ м/с; б – при $v_0 = 20$ м/с: 1 – $d_g = 2 \times 10^{-5}$ м; 2 – $d_g = 3 \times 10^{-5}$ м; 3 – $d_g = 4 \times 10^{-5}$ м.

Figure 2. Dependence of the relative turbulization coefficient on the angular velocity of aerosol rotation under conditions of hydro-vortex coagulation: а – when $d_g = 4 \times 10^{-5}$ m: 1 – $v_0 = 10$ m/s; 2 – $v_0 = 20$ m/s; 3 – $v_0 = 30$ m/s; б – when $v_0 = 20$ m/s: 1 – $d_g = 2 \times 10^{-5}$ m; 2 – $d_g = 3 \times 10^{-5}$ m; 3 – $d_g = 4 \times 10^{-5}$ m.

Рис. 3. Зависимость коэффициента турбулизации от угловой скорости вращения в условиях гидровихревой коагуляции: 1 – $d_g = 2 \times 10^{-5}$ м; 2 – $d_g = 3 \times 10^{-5}$ м; 3 – $d_g = 6 \times 10^{-5}$ м при $v_0 = 30$ м/с.

Figure 3. Dependence of the turbulization coefficient on the angular velocity of rotation under conditions of hydro-vortex coagulation: 1 – $d_g = 2 \times 10^{-5}$ m; 2 – $d_g = 3 \times 10^{-5}$ m; 3 – $d_g = 6 \times 10^{-5}$ m when $v_0 = 30$ m/s.

Второй этап траектории движения капель аэрозоля в горной выработке соответствует их свободному движению под действием сил Стокса и Архимеда, а также кинетической энергии поступательного движения воздуха в горной выработке, и подробно описан в статье.

Таким образом, выразив коэффициент сопротивления в уравнениях (3), (4) движения капли аэрозоля в условиях как установившегося стоксовского движения, так и не установившегося гидродинамического инерционного надстоксовского движения в функции критериев Эйлера, Рейнольдса и Архимеда, получив уравнения для расчета их средних значений на траектории движения аэрозолей, используя соотношения для стоксовского режима течения [12,15], можно вычислять интегральные параметры движения частиц аэрозоля в горных выработках в процессе гидровихревого пылеподавления, учитывая их влияние на распределение концентрации взрывоопасных пылевых аэрозолей, определяемых коэффициентом турбулентности.

Параметры движения капель аэрозолей в горной выработке при гидровихревой коагуляции с учетом [10] представим в виде:

$$v_{ri} = v_{roi} \exp\left(-\frac{t_i}{\tau_{\Sigma i}}\right) + U_r; \quad (24)$$

$$v_{zi} = v_{z0i} \exp\left(-\frac{t_i}{\tau_{zi}}\right) - \frac{3}{16} \cdot \frac{(1+k_{zi})(\rho_{zi} - \rho_r)d_{zi}^2}{\Phi_i \mu_r} g + U_z; \quad (25)$$

$$r_i = v_{r0i} \tau_{zi} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_i}{\tau_{zi}}\right)\right) + U_r t_i. \quad (26)$$

Уравнение для z_i может быть получено по аналогии с формулой (26) с учетом (25) осреднением угловой скорости ω_{zi} и с учетом осреднения коэффициента сопротивления k_r , поскольку дисперсия завихренности аналогична динамической вязкости.

С учетом формулы (7) уравнение для расчета коэффициента турбулизации в области, прилегающей к зоне пылеподавления, можно уточнить посредством введения коэффициента влияния циркуляции завихренности k_ω , представив его в виде:

$$k_\omega = 1 + \frac{\exp\left(-\frac{t_i}{\tau_{zi}}\right) \omega_{0i} d_{zi}}{U}. \quad (27)$$

На рис. 2, а, б приведены результаты расчета по предложенной математической модели и экспериментальных исследований изменения коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от угловой скорости вращения капли аэрозоля в условиях гидровихревого пылеподавления.

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, а, б, подтверждает вывод о существенном снижении коэффициента аэродинамического сопротивления движению капли аэрозоля при увеличении угловой скорости вращения в условиях гидровихревого пылеподавления. Снижение коэффициента аэродинамического сопротивления движению капли аэрозоля функционально связано с увеличением времени неустановившегося инерционного надстоксовского движения, способствует увеличению длины инерционного пробега и как результат – росту зоны гидродинамического пылеподавления, т. е. повышению энергоэффективности.

При угловой скорости вращения капель жидкости в условиях гидровихревого пылеподавления, равной 10^5 с^{-1} , объем зоны пылеподавления увеличивается не менее чем на 20 %. Характерной особенностью является более существенное снижение коэффициента аэродинамического сопротивления с уменьшением начальной скорости капли аэрозоля и увеличением ее диаметра.

На рис. 3 приведены графики изменения коэффициента турбулизации в условиях гидровихревой коагуляции в зоне пылеподавления в зависимости от диаметра капель жидкости. Результаты экспериментов подтверждают, что с увеличением угловой скорости вращения капель жидкости и их диаметра в условиях гидровихревой коагуляции коэффициент турбулизации в области, прилегающей к зоне пылеподавления, возрастает на 10–20 %.

Выводы

1. Полученные критерии подобия и уравнения движения пылевых аэрозолей в горных выработках с учетом критериев гидровихревой инерции и аэрационного витания аэрозолей с использованием осредненных значений коэффициента аэродинамического сопротивления и времени неустановившегося инерционного надстоксовского движения позволяют с достаточной точностью вычислять параметры движения пылевых аэрозолей и их распределение по горной выработке.

2. Гидровихревая коагуляция способствует увеличению на 20 % зоны пылеулавливания и на 10–20 % – росту коэффициента турбулизации, повышая энергоэффективность пылеподавления.

3. Результаты расчетов по предложенной математической модели и проведенные эксперименты показали достаточную достоверность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мохначук И. И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. 2008. № 2. С. 21–26.
2. Скопинцева О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // ГИАБ. 2011. С. 315–325.
3. Либецкий К. Пылевые опасности в горнодобывающей промышленности. Польша, Катовице: Главный институт горного дела, 2004. 486 с.
4. Cecala A. B., O'Brien A. D., Schall J. et al. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing: Report of Investigations 9689. Pittsburgh: National Institute for Occupational Safety and Health, 2012. 314 p.
5. Макаров В. Н., Косарев Н. П., Макаров Н. В., Угольников А. В., Лифанов А. В. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2018. Т. 18, № 2. С. 178–189.
6. Макаров В. Н., Макаров Н. В., Потапов В. В., Горшкова Э. М. Перспективный способ повышения эффективности высоконапорного гидрообеспыливания // Вестник ЗабГУ. 2018. Т. 24, № 5. С. 13–20.
7. Makarov V. N., Davydov S. Ya. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56, issue 1. P. 103–106. <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7>
8. Pashkov E. N., Martyushev N. V., Masson I. A. Evaluation of gravitational force effect on balancing processes in liquid-type autobalancing devices // Advanced Materials Research. 2014. T. 1040. C. 642–645. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.642>
9. Bautin S. P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. 2014. T. 52, №2. С. 259–263. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14020035>

10. Макаров В. Н., Потапов В. Я., Давыдов С. Я., Макаров Н. В. Метод аддитивного аэродинамического расчета узла классификации фрикционных аппаратов // Новые огнеупоры. 2017. № 6. С. 40–44. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-40-44>
11. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкерев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1–24.
12. Organiscak J. A., Cecala A. B., Thimons E. D., Heitbrink W. A., Schmitz M., Ahrenholtz E. NIOSH/industry collaborative efforts show improved mining equipment cab dust protection / ed. W. R. Yernberg // Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 2003. Vol. 314. P. 145–152.
13. Lyashenko V. I., Gurin A., Topolny F. F., Taran N. A. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants // Metallurgical and Mining Industry. 2017. № 4. P. 8–17.
14. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М: Высш. школа, 1966. 487 с.
15. Novakovskiy N. S., Bautin S. P. Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894, № 1. 012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012067>

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2020 года

Mine aerology of dust aerosols under conditions of hydro-vortex coagulation

Nikolay Petrovich KOSAREV*

Vladimir Nikolaevich MAKAROV**

Aleksandr Vladimirovich UGOL'NIKOV***

Nikolay Vladimirovich MAKAROV****

German Petrovich DYLDIN*****

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Dust suppression is the most popular method for depositing dust from the air to blast isolation. Improving the isolation system for probable coal dust explosions is an integral part of the problem of dust explosion protection of mining enterprises, the solution of which is one of the most important tasks in the field of occupational safety and health.

Purpose: study of physics of the process and the construction of a mathematical model of the movement of aerosols in mine workings in a wide range of changes in the inertial kinematic parameters of the air flow.

Research methods. Based on the Boussinesq equation, the Fourier rule and the similarity theorem of complex systems, the analogy of vorticity dispersion and kinematic viscosity, a mathematical model of the movement of dust aerosols under hydro-vortex coagulation conditions is constructed. Some similarity criteria are obtained that ensure the identity of experimental studies and real aerological processes in mines, as well as criterion equations for calculating the coefficient of aerodynamic drag and the time of unsteady inertial motion.

Results. Equations are obtained that make it possible to identify aerodynamic processes of aerosol motion under hydro-cyclonic dust suppression through the criteria of Reynolds, Euler and Archimedes, corresponding to the over-Stokes and Stokes flow regimes. The possibility of reducing the aerodynamic resistance to 20% during hydro-vortex coagulation has been confirmed, which makes it possible to increase the energy efficiency of dust suppression by up to 15% and to increase the turbulization coefficient by at least 20%, thereby reducing the likelihood of a hazardous concentration of dust aerosols.

Application. The use of the proposed mathematical model will make it possible to better calculate local aerological processes in mine workings and, as a consequence, to increase the efficiency of turbulization and dust suppression process control at mining enterprises.

Keywords: aerology, hydro-vortex coagulation, similarity criteria, inertial kinematic parameters, turbulization coefficient, dust aerosols, dust collection.

REFERENCES

1. Mokhnachuk I. I. 2008, Safety problems at coal mining enterprises. *Ugol'* [Coal], no. 2, pp. 21–26. (In Russ.)
2. Skopintseva O. V. 2011, Scientific substantiation of an integrated method for reducing dust and gas hazards in coal mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], pp. 315–325. (In Russ.)
3. Libetski K. 2004, *Pylevyeye opasnosti v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Dust hazards in the mining industry]. Poland, 486 p.
4. Cecala A. B., O'Brien A. D., Schall J. et al. 2012, Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing: Report of Investigations 9689. Pittsburgh: National Institute for Occupational Safety and Health, 314 p.
5. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugolnikov A. V., Lifanov A. V. 2018, Effective isolation of coal dust explosions using hydro-vortex coagulation. *Vestnik PNIPU* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University], Geology. Oil and gas and mining, vol. 18, no. 2, pp. 178–189. (In Russ.)
6. Makarov V. N., Makarov N. V., Potapov V. V., Gorshkova E. M. 2018, Promising way to improve the efficiency of high-pressure hydro-dusting. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of the Trans-Baikal State University], vol. 24, no. 5, pp. 13–20. (In Russ.)
7. Makarov V. N., Davydov S. Ya. 2015, Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 56, issue 1, pp. 103–106. <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7>
8. Pashkov E. N., Martyushev N. V., Masson I. A. 2014, Evaluation of gravitational force effect on balancing processes in liquid-type autobalancing devices. *Advanced Materials Research*, vol. 1040, pp. 642–645. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.642>

✉ iuggu-journal@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0128-5859>

** uk.intelnedra@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3785-5569>

*** ugolnikov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8442-4841>

**** mnikolay84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7039-6272>

***** German.Dyldin@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

9. Bautin S. P. 2014, Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. High temperature, vol. 52, no. 2, pp. 259–263. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14020035>
10. Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. 2017, Method for additive aerodynamic calculation of the friction apparatus classification unit. *Novyye ognepory* [New refractories], no. 6, pp. 40–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-6-40-44>
11. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkarev Yu. A. 2007, Basics of wet dedusting. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], no. 10, pp. 1–24. (In Russ.)
12. Organiscak J. A., Cecala A. B., Thimons E. D., Heitbrink W. A., Schmitz M., Ahrenholtz E. 2003, NIOSH/industry collaborative efforts show improved mining equipment cab dust protection / ed. W. R. Yernberg. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, vol. 314, pp. 145–152.
13. Lyashenko V. I., Gurin A., Topolny F. F., Taran N. A. 2017, Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants. *Metallurgical and Mining Industry*, vol. 4, pp. 8–17.
14. Venikov V. A. 1966, *Teoriya podobiya i modelirovaniya primenitel'no k zadacham elektroenergetiki* [Theory of similarity and modeling as applied to the problems of the electric power industry]. Moscow, 487 p.
15. Novakovskiy N. S., Bautin S. P. 2017, Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 894, no 1. 012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/894/1/012067>

The article was received on September 28, 2020