

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.23.05:622.807

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГИДРОВИХРЕВЫХ ФОРСУНОК ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ

В. Н. Макаров, А. В. Угольников, Н. В. Макаров, Л. А. Антропов

*Уральский государственный горный университет,
E-mail: uk.intelnedra@gmail.com, ул. Куйбышева, 30, 620144, г. Екатеринбург, Россия*

На базе математической модели гидровихревой ортокинетической инерционной гетерокоагуляции выбраны параметры гидровихревой форсунки устройства пылеподавления для предотвращения взрывов и техногенных аварий на горных предприятиях. С использованием теории подобия и анализа размерностей получены критерии подобия процесса диспергирования в условиях вращательного движения капель жидкости. Показано, что основными критериями эффективности дробления капель жидкости гидровихревой форсунки являются критерий Вебера, критерий Лапласа и три индикатора, характеризующие инерционность, вязкость жидкости и кинематическое подобие. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования выявили возможность повышения на 15 % эффективности диспергирования, уменьшения в 2.5 раза осредненного диаметра капель жидкости, снижения на 10 % ее расхода.

Гидровихревая ортокинетическая инерционная гетерокоагуляция, гидровихревая форсунка, циркуляционное движение, критерий Вебера, критерий Лапласа, присоединенный вихрь, индикаторы подобия, эффективность диспергирования

DOI: 10.15372/FTPRPI20220111

Подавление пыли на горных предприятиях представляет собой одну из важнейших задач. Причина образования взрывоопасной пылевоздушной среды — высокие твердость и хрупкость горных пород, приводящие к интенсивному пылеобразованию при отделении горных пород от массива и транспортировании. Взрывы газа и пыли существенно различаются, однако взрывчатые свойства газов и пыли имеют много общего, что делает возможным разработку комплексных методов снижения газовой и пылевой опасностей выемочных участков на горных предприятиях.

Травматизм с тяжелыми последствиями от взрывов пыли на горных предприятиях составляет более 8 %. Это определяет особую социальную значимость предупреждения и локализации взрывов пылевоздушных смесей в шахтах и защиты персонала. Мероприятия обеспечения пылевого режима в шахтах основаны на недопущении взрывоопасных скоплений пыли и предотвращении появления источника высокой температуры, способного воспламенить пы-

левые аэрозоли. Кроме того, пыль негативно влияет на организм человека, вызывая заболевания легких — силикоз (при воздействии породной пыли), антракоз (при воздействии угольной пыли). Активно действуют на легкие человека частицы пыли размером менее $5 \cdot 10^{-6}$ м, будучи практически гидрофобными.

Наибольшую актуальность проблема взрыва пылегазовых смесей представляет для газообильных угольных шахт, и в первую очередь для подготовительных забоев, в которых происходит более половины аварий. На таких шахтах успешная борьба с образованием взрывоопасной пылегазовой среды возможна только на основе рационального сочетания пылеподавления и дегазации.

Исследования показывают, что более 60 % случаев образования взрывоопасной среды могут быть исключены при эффективном пылеподавлении. Поглощение или подавление витающей пыли диспергированной жидкостью наиболее распространенный и легко осуществимый способ снижения запыленности технологического пространства. Он основан на смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием гетерокоагуляционной системы “капля жидкости — частица пыли”, которая выпадает из воздуха и осаждается на поверхность [1 – 3].

Переходные газодинамические явления в выработках, вызванные резкими изменениями распределения энергии депрессий в процессе гидровихревого пылеподавления, существенно влияют на общие параметры концентрации пылевых аэрозолей атмосферы шахты. Указанное может приводить к негативным последствиям возникновения застойных зон, нежелательных обратных и вихревых течений, снижению обеспыливающей эффективности вентиляции в целом.

Системы пылеподавления, получившие наибольшее распространение на горных предприятиях, в большинстве своем не позволяют обеспечить снижение запыленности до допустимой концентрации. Особенно это относится к гидрофобным частицам пыли диаметром менее $5 \cdot 10^{-6}$ м. По данной причине повышение эффективности гидрообеспыливания, разработка принципиально новых средств, в том числе форсунок для диспергирования жидкости с размером капель менее $5 \cdot 10^{-6}$ м, остается весьма актуальной задачей [4 – 7].

Наиболее распространенное направление снижения затрат, включающее расход жидкости на гидрообеспыливание и повышение его эффективности, основано на применении высокого давления. Повышение давления жидкости до $15 \cdot 10^6$ Па качественно меняет параметры процесса диспергирования жидкости. Происходит эффективная инерционная ортокинетическая гетерокоагуляция частиц пыли и капель жидкости. В этом случае существенно меняются характеристики факела орошения, прежде всего его активной зоны, повышается плотность и дисперсность до $5 \cdot 10^{-6}$ м, а также скорость движения капель жидкости [8 – 10].

Интенсификация эжекции пылевых частиц в газе факелом диспергированной жидкости увеличивает зону очищаемого от пыли технологического пространства и повышает эффективность пылеподавления частиц размером до $3 \cdot 10^{-6}$ м. Высоконапорное диспергирование, по сравнению с низконапорным обеспыливанием, позволяет снизить запыленность в 3 раза, уменьшив расход воды в 2.5 раза. Однако дальнейшее повышение давления при высоконапорном распылении жидкости приводит к существенному росту энергетических затрат и, как результат, к снижению эффективности пылеулавливания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В [11] для повышения эффективности пылеподавления предложен механизм гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции. Формирование устойчивого вихря в зоне контакта частицы пыли с вращающейся каплей жидкости, выходящей из спроектированной соответствующим образом гидровихревой форсунки, приводит к существенному снижению энергетического барьера аэродинамического напора, что повышает эффективность захвата каплями жидкости частиц пыли при меньших энергетических затратах.

Процессы взаимодействия капель жидкости и частиц пыли при гидровихревой ортокинетической инерционной коагуляции можно разделить на три группы, определяющие три уровня энергетического состояния системы “капля жидкости – частица пыли”: захват частиц пыли каплями жидкости за счет аэрогидродинамических и пневматических факторов в зоне факела диспергирования; дальнотействующее электромагнитное взаимодействие, вызванное электризацией и намагничиванием при диспергировании капель жидкости и частиц пыли; межмолекулярное взаимодействие капель жидкости и частиц пыли, элементарное адгезионное взаимодействие. В активной зоне факела высоконапорного диспергирования жидкости основную роль играет обеспечение эффективности пылеулавливания (гидровихревой коагуляции), аэрогидродинамические и кинематические процессы, позволяющие преодолеть энергетический барьер для осуществления коагуляции (перехода капли жидкости и частицы пыли на более высокий энергетический уровень). На динамически активном начальном участке, в котором происходит диспергирование жидкости, остальные факторы незначительны, что позволяет не учитывать их влияние при создании математической модели гидровихревых форсунок.

Для реализации способа гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции разработана и защищена патентом гидровихревая форсунка [12]. Целью настоящей работы является получение на основе математической модели гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции в факеле диспергируемой жидкости формул для расчета геометрических параметров запатентованной гидровихревой форсунки и кинематических параметров ее факела при высоконапорном обеспыливании [4, 9, 11 – 15].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С использованием уравнения Бернулли скорость истечения жидкости из гидровихревой форсунки можно получить в виде [8]

$$V_{0ef} = \sqrt{(V_{0j} - V_g)^2 + 0.25d_k^2\omega_j^2} = k_f \sqrt{\frac{2\delta P}{\rho_j}}, \quad (1)$$

где V_{0j} — начальная расходная скорость движения капли жидкости, м/с; δP — разность давлений на входе и выходе гидровихревой форсунки, Па; $k_f = 0.73 - 0.98$ — коэффициент формы канала гидровихревой форсунки, определяющий уменьшение расходной скорости жидкости и, соответственно, объемного расхода форсунки; V_g — скорость газа, м/с; d_k — диаметр канала гидровихревой форсунки, м; ρ_j — плотность жидкости, кг/м³; ω_j — угловая скорость вращения капли жидкости вокруг вектора расходной скорости, с⁻¹.

Основная характеристика эффективности диспергирования жидкости гидровихревой форсункой — степень распыления, т. е. относительный диаметр капель жидкости $\bar{d}_j = d_j / d_c$, определяемый как отношение осредненного диаметра капель жидкости к диаметру канала гидровихревой форсунки. Так как диаметр d_k является ее основным геометрическим параметром, то в статье с использованием теории подобия и анализа размерностей для оценки эффективности диспергирования определен относительный средний диаметр канала жидкости на выходе из гидровихревой форсунки [16].

Вторая теорема подобия [17] дает возможность получить обобщенную функциональную зависимость параметров исследуемого процесса гидровихревого инерционного диспергирования капель жидкости и частиц пыли при пылеподавлении. В уравнениях связываются между собой безразмерные независимые параметры, состоящие из физических величин с заданной размерностью, характеризующие процесс гидровихревого диспергирования и поглощения, выраженные только через основные единицы измерения.

Установим зависимость между относительным диаметром гидровихревой форсунки и физическими величинами, определяющими процесс инерционной ортокинетической гидровихревой гетерокоагуляции. На процесс распыления жидкости гидровихревой форсункой на осредненный диаметр капель жидкости $\bar{d}_j$ влияют следующие параметры:

- геометрические — диаметр канала гидровихревой форсунки d_k , м;
- кинематические — поступательная скорость движения капель жидкости V_j , м/с; скорость газа V_g , м/с; угловая скорость вращения капель жидкости ω_j , с⁻¹;
- динамические — коэффициент поверхностного натяжения капель жидкости Δ_j , Дж/м²; коэффициент динамической вязкости капель жидкости μ_j и газа μ_g , кг/м·с; плотность жидкости ρ_j и газа ρ_g , кг/м³.

Для построения критериального уравнения зависимости осредненного относительного диаметра капель жидкости $\bar{d}_j$ запишем эту зависимость от параметров, характеризующих процесс гидровихревого диспергирования и коагуляции, в форме безразмерной степенной функции:

$$\bar{d}_j = k \sqrt{(V_j - V_g)^2 + 0.25 \omega_j^2 d_k^2}^a \rho_g^b d_k^c \Delta_j^d \rho_j^e \mu_j^f \mu_g^g \omega_j^h, \quad (2)$$

где a, b, c, d, e, f, g, h — показатели степени функции; k — коэффициент пропорциональности в критериальном уравнении.

Для нахождения критериев подобия составим таблицу размерностей независимых параметров:

$$\|M\| = \begin{vmatrix} L \\ M \\ T \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \sqrt{(V_j - V_g)^2 + 0.25 \omega_j^2 d_k^2} \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \rho_g \\ d_k \\ \Delta_j \\ \rho_j \\ \mu_j \\ \mu_g \\ \omega_j \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -3 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -3 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

в которой L, M, T — размерности длины, массы и времени. Количество независимых переменных равно трем. С учетом второй теоремы подобия и π -теоремы число индикаторов подобия, т. е. безразмерных параметров, характеризующих процесс диспергирования, равно 5, поскольку определяется как разность между числом размерных физических параметров в уравнении (2), равном 8, и количеством независимых переменных, число которых равно 3.

Показатели степени в уравнении (2) по элементам таблицы (3) находим из решения однородной системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} a - 3b + c - 3e - f - g = 0; \\ b + 2 + e + f + g = 0; \\ -a - 2d - f - g = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В результате решения (4) получаем матрицу индикаторов подобия:

$$\|M_{\pi}\| = \begin{vmatrix} & d_k & \Delta_j & \mu_g & \rho_g & \rho_j & \sqrt{(V_j - V_g)^2 + 0.25d_k^2\omega_j^2} & \omega_j & \mu_j \\ \pi_1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ \pi_2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ \pi_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \pi_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ c & d & g & b & e & a & h & f \end{vmatrix}, \quad (5)$$

из которой находим пять безразмерных комплексов — критериев подобия:

— критерий Вебера, характеризующий устойчивость капель жидкости к дроблению:

$$\pi_1 = \text{We}_{c(ef)} = \frac{[(V_j - V_g)^2 + 0.25d_k^2\omega_j^2]\rho_g d_k}{\Delta_j},$$

— критерий Лапласа, отражающий отношение сил вязкости и поверхностного натяжения:

$$\pi_2 = L_p = \frac{d_k \rho_j \Delta_j}{\mu_j^2},$$

— индикатор инерционной характеристики жидкости и газа:

$$\pi_3 = \frac{\rho_g}{\rho_j}, \quad (6)$$

— индикатор, определяющий соотношение сил вязкости жидкости и газа:

$$\pi_4 = \frac{\mu_g}{\mu_j},$$

— индикатор кинематического подобия процесса гидровихревого диспергирования и коагуляции (φ — угол спирали вращающейся капли жидкости):

$$\frac{\pi_5}{2} = \pi_k \frac{d_k \omega_j}{\sqrt{(V_j - V_g)^2 + 0.25d_k^2\omega_j^2}} = \cos \varphi.$$

Физические основы формирования и сохранения стабильности капли жидкости при диспергировании определяются критическим равновесием между поверхностным натяжением и внешним воздействием на поверхность капли и характеризуются критерием Вебера. В условиях гидровихревого высоконапорного инерционного диспергирования жидкости разложение на капли и дробление капель происходит при условии, когда аэродинамический скоростной напор поступательного движения капель жидкости относительно газа в совокупности с инерционными центробежными силами вращательного движения капель жидкости с угловой скоростью ω_j превышают силы их поверхностного натяжения.

В области чисел Рейнольдса $10^2 < Re_j < 10^4$, характерных для высоконапорного диспергирования жидкости, именно указанное соотношение играет доминирующую роль в процессе каплеобразования. При этом другие физико-химические явления не оказывают на него практического влияния.

Корреляция эффективной начальной скорости распыления жидкости V_{0j} с перепадом давления на гидровихревой форсунке и начальной угловой скоростью вращения ω_{0j} подтверждает целесообразность применения гидровихревых форсунок при высоконапорном распылении. Это обусловлено тем, что эффективное значение критерия Re_{ef} в условиях гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции имеет вид

$$Re_{ef} = \frac{\sqrt{(V_j - V_g)^2 + 0.25d_k^2 \omega_j^2} d_k \rho_j}{\mu_j}, \quad (7)$$

т. е. при одном и том же значении расходной скорости диспергированной жидкости V_j , изменяя скорость вращения капель жидкости ω_j , можно управлять эффективными значениями критериев Re_{ef} и We_{ef} .

Критический уровень устойчивости вращающихся капель жидкости к дроблению под действием скоростного аэродинамического напора и центробежных сил при набегании на поток газа в соответствии с уравнением Лапласа [8, 9, 15, 18] определяется по формуле:

$$(V_j - V_g)^2 + 0.25d_k^2 \omega_j^2 = 8 \frac{\Delta_j}{d_j^v} \gamma \rho_g, \quad (8)$$

где d_j^v — критический диаметр устойчивости к диспергированию вращающейся капли жидкости, м; γ — коэффициент аэродинамического сопротивления газа.

С учетом (6), (8) критерий Вебера, соответствующий диаметру капли жидкости, при котором нарушается условие устойчивости (происходит ее дробление), рассчитывается как

$$We_{efcr} = \frac{8}{\gamma}. \quad (9)$$

В соответствии с (8), (9) при высоконапорном гидровихревом диспергировании эффективные критические значения критерия Вебера We_{efcr} и коэффициента аэродинамического сопротивления газа играют доминирующую роль и характеризуются кинематическими и динамическими параметрами движения вращающейся капли жидкости по спирали.

При переменных числах Рейнольдса коэффициент аэродинамического сопротивления газа непрерывно изменяется в процессе движения капель жидкости в активной зоне факела. Однако исследования, проведенные в [7], показали, что с достаточной для расчетов точностью коэффициент сопротивления может быть рассчитан путем осреднения кинематических параметров движения капель жидкости. Учитывая, что в активной зоне факела расходуется не менее 99.8 % кинетической энергии капель жидкости, среднее значение коэффициента аэродинамического сопротивления газа может определяться по формуле $\gamma_{cp} = (1 + 0.07 Re_{0ef}^{0.687}) / Re_{0ef}$, где Re_{0ef} — эффективное значение критерия Рейнольдса на выходе из гидровихревой форсунки [1, 9, 18, 19].

В диапазоне чисел Рейнольдса, соответствующих высоконапорному гидровихревому диспергированию, эффективное критическое значение критерия Вебера с учетом [9] и изложенного ранее определяется как

$$We_{efcr} = f(Re_{ef}) = \frac{Re_{0ef}}{3.38(1 + 0.07 Re_{0ef}^{0.687})}.$$

Таким образом, увеличение эффективного критерия Рейнольдса снижает коэффициент аэродинамического сопротивления и повышает эффективный критерий Вебера. В условиях автомодельности, т. е. независимости соотношения сил инерции и вязкости от эффективной скорости движения капель жидкости, при числе Рейнольдса $Re > 3 \cdot 10^3$ критерий Вебера и коэффициент аэродинамического сопротивления остаются постоянными.

Учитывая инерционное торможение капель жидкости в активной зоне факела распыления и, соответственно, уменьшение эффективных значений числа Рейнольдса по отношению к его значению на выходе из гидровихревой форсунки, эффективное значение критерия Вебера с учетом данных, приведенных в [9], составляет 80 % от начального.

Исходя из результатов экспериментальных исследований и проведенных расчетов, на рис. 1 приведен график зависимости критических значений критерия Вебера от числа Рейнольдса при различных значениях угловой скорости вращения диспергируемой жидкости 0 (1), 10^3 (2), 10^4 (3) и 10^5 с⁻¹ (4).

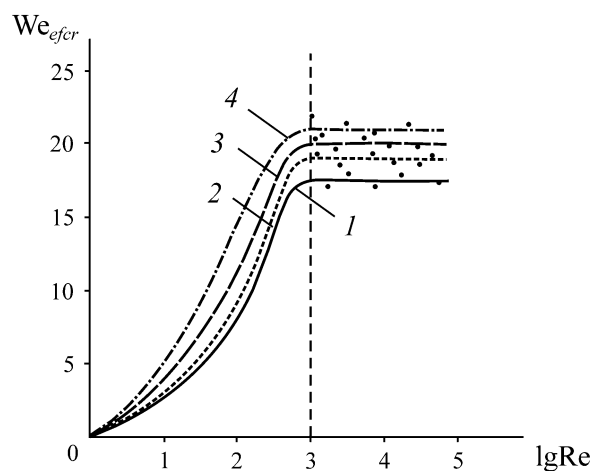


Рис. 1. Зависимость критических значений критерия Вебера от числа Рейнольдса при угловой скорости вращения диспергируемой жидкости 0 (1), 10^3 (2), 10^4 (3) и 10^5 с⁻¹ (4)

Видно возрастание критерия Вебера с увеличением угловой скорости вращения капле жидкости за счет повышения значений эффективного числа Рейнольдса. При $Re > 3 \cdot 10^3$ в зависимости от угловой скорости вращения капле жидкости критические значения критерия Вебера — 17.7, 19, 20, 21. Эти критические значения Вебера отклоняются не более чем на $\pm 6\%$. Рост We_{efcr} при угловой скорости вращения капле жидкости 10^5 с^{-1} достигает 20 %, что дает возможность при фиксированной расходной скорости V_{0j} увеличивать степень диспергирования (дробления капле жидкости). При высоконапорном гидровихревом пылеподавлении $Re > 3 \cdot 10^3$ полученные значения We_{efcr} используются для расчета диаметра канала гидровихровой форсунки.

При расчете диаметра капле жидкости d_j его необходимо выразить через критическое значение эффективного критерия Вебера. С учетом [8, 9] и формул (8), (9), для заданного канала гидровихровой форсунки запишем:

$$\bar{d}_j = \frac{d_j}{d_k} = \frac{We_{efcr}}{We_{c(efcr)}},$$

где $We_{c(efcr)}$ — критический критерий Вебера для диаметра канала гидровихровой форсунки.

По результатам экспериментальных исследований (рис. 1) определены коэффициенты аэродинамического сопротивления газа при переменных числах Рейнольдса: $\gamma_1 = 0.45$; $\gamma_2 = 0.42$; $\gamma_3 = 0.38$; $\gamma_4 = 0.36$. С учетом этого диаметр диспергированной капле жидкости при заданном диаметре канала гидровихровой форсунки можно вычислить как $\bar{d}_j = 6.4 / \gamma We_{c(efcr)}$.

На рис. 2 показана зависимость диаметра капле диспергированной жидкости от критического значения числа Рейнольдса при разных угловых скоростях капле, т. е. разных значениях эффективного числа Рейнольдса при заданной расходной скорости движения жидкости на выходе из гидровихровой форсунки. Диаметр капле жидкости и угловая скорость их вращения определяют косвенным путем исходя из геометрии форсунок и скорости V_j . Графики показывают высокую эффективность диспергирования капле жидкости в гидровихровых форсунках за счет роста угловой скорости их вращения. В диапазоне $Re = 10^3 - 10^5$ угловая скорость вращения позволяет снизить диаметр капле в 1.67 – 2.50 раза.

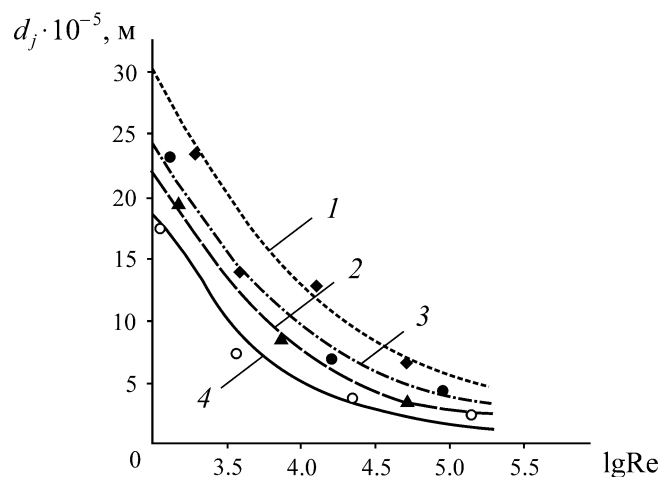


Рис. 2. Зависимость диаметра капле диспергируемой жидкости от числа Рейнольдса при $\omega_j = 0$ (1), 10^3 (2), 10^4 (3) и 10^5 с^{-1} (4); $d_k = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

ВЫВОДЫ

Основными критериями, определяющими подобие физического процесса, гидровихревого ортокинетического гетерокоагуляционного диспергирования и коагуляции в гидровихревых форсунках, являются эффективный критерий Вебера и эффективный критерий Рейнольдса, рассчитываемые по результирующей начальной скорости движения жидкости из форсунки.

Эффективность диспергирования при использовании высоконапорных гидровихревых форсунок позволяет увеличить зону пылеподавления на 15 % за счет снижения коэффициента аэродинамического сопротивления газа с 0.445 до 0.387 в диапазоне роста эффективных значений критерия Рейнольдса с повышением угловой скорости вращения капель жидкости и в 2.5 раза уменьшить диаметр капель жидкости. Это позволяет на 10 % снизить расход жидкости при обеспыливании гидровихревым способом. Снижение расхода жидкости обусловлено уменьшением расходной скорости при равном давлении за счет закручивания капель жидкости и снижения коэффициента аэродинамического сопротивления газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han H., Wang P., and Liu R. Experimental study on atomization characteristics and dust-reduction performance of four common types of pressure nozzles in underground coal mines, *Int. J. Coal Sci. Technol.*, 2020. — P. 581–596.
2. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., and Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face, *Powder Technol.*, 2019, Vol. 343. — P. 754–764.
3. Скопинцева О. В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // ГИАБ. — 2011. — С. 315–325.
4. Макаров В. Н., Косарев Н. П., Макаров Н. В., Угольников А. В., Лифанов А. В. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — № 2. — Т. 18. — С. 178–189.
5. Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Афонасенко Е. П., Носырев М. Б. Локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой инерционной коагуляции // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 173–179.
6. Валиев Н. Г., Кошкаров В. Е., Симисинов Д. И., Ахметов А. Ф., Неволин Д. Г. Эмульсионные профилактические средства из тяжелых нефтяных остатков для обеспыливания карьерных автодорог и отвалов техногенных отходов // Горн. журн. — 2015. — № 8. — С. 13–21.
7. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., and Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face, *Powder Technol.*, 2019, Vol. 343. — P. 754–764.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
9. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкерев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — № 10. — С. 1–24.
10. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., and Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control, *Appl. Sci. (Switzerland)*, 2017, Vol. 7, No. 1. — P. 5–20.
11. Макаров В. Н., Макаров Н. В. Перспективы вихревого гидрообеспыливания в угольных шахтах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 93–98.

12. Пат. 2737161 С1 РФ, МПК E21F 5/04, B05B 1/34, B05B 7/00. Способ гидровихревого кинематического пылеподавления и устройство для его реализации / В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, А. В. Угольников и др. // Оpubл. в БИ. — 2020. — № 33.
13. **Bautin S. G., Krutova I. Y., and Obukhov A. G.** Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces, *High Temp.*, 2015, Vol. 53, No. 6. — P. 928–930.
14. **Bautin S. P.** Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow, *High Temperature*, 2014, Vol. 52, No. 2. — P. 259–263.
15. **Lyashenko V. I., Gurin A., Topolny F. F., and Taran N. A.** Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants, *Metall. Min. Ind.*, 2017, No. 4. — P. 8–17.
16. **Веников В. А.** Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. — М.: Либроком, 2014. — 439 с.
17. **Алабужев П. М., Геронимус В. Б., Минкевич Л. М., Шеховцов Б. А.** Теории подобия и размерностей. Моделирование. — М.: Высш. шк., 1968. — 208 с.
18. **Novakovskiy N. S. and Bautin S. P.** Numerical simulation of shock-free strong compression of 1D gas layer, *J. Physics: Conf. Series*, 2017, Vol. 894, No. 1. — Article ID 012067.
19. **Косарев Н. П., Макаров В. Н., Угольников А. В., Макаров Н. В., Дылдин Г. П.** Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции // *Изв. УрГУ*. — 2020. — № 4 (60). — С. 155–165.

Поступила в редакцию 16/VI 2021

После доработки 14/X 2021

Принята к публикации 24/XII 2021