

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-82-90

УДК 622.23.05:622.807

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ПРИ ГИДРОВИХРЕВОЙ КОАГУЛЯЦИИ

Угольников Александр Владимирович,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ugolnikov@yandex.ru

Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург, ул.
Куйбышева, 30.

Информация о статье

Поступила:

03 сентября 2021 г.

Рецензирование:

30 сентября 2021 г.

Принята к печати:

25 октября 2021 г.

Ключевые слова:

высоконапорное
обеспыливание, гидровихревая
форсунка, циркуляционное
движение, присоединенный
вихрь, эффективность
пылеулавливания

Аннотация.

Актуальность повышения эффективности пылеулавливания обусловлена ростом производительности труда на горных предприятиях. Для повышения эффективности высоконапорного пылеподавления предложена технология и математическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции. Разработана математическая модель гидровихревой коагуляции, позволяющая исследовать кинематику и динамику механизма взаимодействия капли жидкости и частицы пыли в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающимися каплями жидкости. Получено уравнение относительной концентрации пыли в факеле распыляемой жидкости в результате реализации механизма гидровихревого пылеулавливания. Верификация результатов моделирования подтвердила достаточную сходимость зависимости повышения эффективности гидровихревого обеспыливания от угловой скорости вращения капель жидкости. Показано, что гидровихревое обеспыливание позволяет повысить эффективность пылеподавления до 99% за счет роста коэффициента захвата и длины активной зоны распыляемой жидкости.

Для цитирования: Угольников А.В. Математическая модель эффективного пылеулавливания при гидровихревой коагуляции // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 5 (147). – С. 82-90 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-82-90

Введение. Технология ведения горных работ обуславливает интенсивное пылеобразование в угольных шахтах. При этом угольная пыль характеризуется низкой смачиваемостью и высокой витаемостью. Рост энерговооруженности интенсивности дробления углей и горных пород способствует увеличению запыленности атмосферы горных выработок, требуя существенных затрат на обеспечение необходимых санитарно-гигиенических условий. Взрывы пыли и газа различаются существенным образом, при этом пыль и взрывчатые газы обладают общими свойствами, что позволяет целенаправленно осуществлять комбинированные методы снижения пылевой и газовой опасности в угольных шахтах [1]. Необходимость очистки воздуха на угольных предприятиях актуальна в связи с ростом производительности труда, достижением все более высоких санитарно-гигиенических норм. Исследования подтверждают, что при интенсификации угледобычи внедрение инновационных технологий переработки минерального сырья в значительной степени ограничено недостаточным совершенством технологий пылеподавления [2, 3]. Пылеподавление – наиболее распространенный способ очистки воздуха,

закрывающийся в смачивании частиц пыли каплями жидкости при соударении с образованием при этом гетерокоагуляционной системы «частица пыли – капля жидкости». Исследования подтверждают, что не менее 65% случаев возникновения взрывоопасной атмосферы в горных выработках может быть локализовано при эффективном пылеподавлении [4, 5].

Актуальность задачи обеспечения безопасных санитарно-гигиенических условий путем пылеподавления наиболее очевидна для газообильных угольных шахт, подготовительных выработок, в которых происходит не менее 60% аварий. Физический процесс пылеподавления заключается в преодолении аэродинамического барьера при столкновении частиц пыли с каплями жидкости, т. е. зависит от эффективности коагуляции, способности капель жидкости захватывать и поглощать частицы пыли. Наиболее эффективным в настоящее время является высоконапорное гидрообеспыливание, однако при нем значительно возрастают затраты энергии на пылеподавление, в результате чего существенно снижается энергоэффективность вспомогательного технологического процесса и достижение требуемых санитарно-гигиенических условий, что обуславливает снижение конкурентоспособности горных предприятий [6, 7].

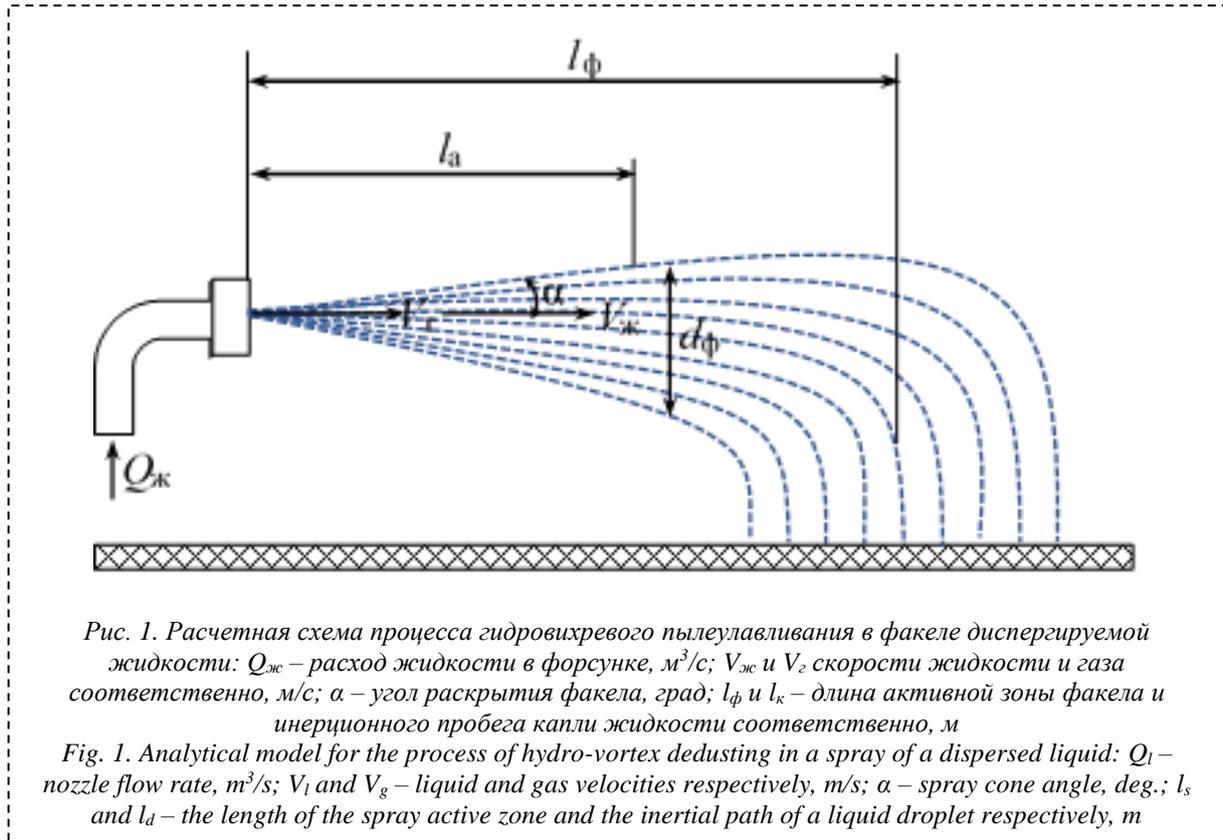
Для повышения эффективности высоконапорного пылеподавления в статьях [8-10] предложена технология и математическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции. Полученная математическая модель гидровихревой коагуляции позволяет исследовать кинематику и динамику механизма взаимодействия вращающейся капли жидкости и частицы пыли в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращением капель жидкости. Теоретические аспекты физико-химических и механических процессов динамики инерционной ортокинетической гидровихревой гетерокоагуляции капель жидкости и частиц пыли на данный момент исследованы не в полной мере. Однако для разработки методики проектирования эффективных гидровихревых форсунок и исследования механизма гидровихревой коагуляции можно воспользоваться особенностями кинематики винтового движения вращающихся капель жидкости, установленными в статьях [4, 5, 7]. Указанное позволяет определить зависимость между параметрами остаточной запыленности и геометрии гидровихревых форсунок.

Постановка задачи. Для построения математической модели эффективности гидровихревого пылеподавления приняты следующие допущения:

- скорость частиц пыли соответствует скорости газа $V_t = V_n$;
- скорость капель жидкости усреднена на всей длине инерционного пробега l_k ;
- коагуляция капли жидкости и частиц пыли осуществляется в надстоксовском режиме течения, т. е. при $1 < Re < 10^4$;
- капля жидкости и частица пыли однородно диспергированы с размерами, соответствующими среднему аэродинамическому и медианно массовому диаметру.

Примем, что технологический уровень достаточности численных значений эффективности пылеулавливания определяется величиной, остаточной относительной концентрации пыли очищенного газа, в частности воздуха E_n . Остаточная относительная концентрация нормативно определяется отношением уровня предельно допустимой концентрации к уровню начальной концентрации пыли в газовой среде. Данный показатель достаточно обоснован как критерий объективной оценки процесса эффективности гидровихревого обеспыливания. Для построения математической модели эффективности гидровихревого обеспыливания в факеле распыляемых капель жидкости необходимо получить уравнение, определяющее фактическую остаточную относительную концентрацию частиц пыли одного размера E_f , представляющую собой парциальный относительный вынос пыли из объема факела.

Проведенные расчеты указывают, что для преодоления запрещающего уровня энергетического и аэродинамического барьеров частицы пыли должны иметь гидродинамический режим обтекания газовым потоком капель жидкости, при котором достигаются критические значения критерия Стокса [8, 9]. Выполнение указанного условия инерционного гетерокоагуляционного поглощения способно обеспечить только инерционно кинетический механизм захвата частиц пыли каплями жидкости в активной зоне факела высоконапорной распыляемой жидкости. Электростатические гравитационные и диффузионные явления в процессе обеспыливания за промежуток времени движения капель жидкости в



активной зоне гидрораспыления не могут обеспечить необходимую кинетическую энергию контакта взаимодействия частиц пыли и капель жидкости, даже если частица пыли достигает поверхности капли жидкости. Как показано в статьях [4, 5] при гидровихревом инерционном пылеподавлении критические значения чисел Стокса за счет угловой скорости вращения капель жидкости существенно меньше, чем при поступательном движении капель жидкости. Указанное позволяет утверждать, что процесс гидровихревого инерционно кинетического взаимодействия капель жидкости с частицами пыли с учетом скорости газа V_g является определяющим фактором создания математической модели порциальной эффективности гидровихревого обеспыливания в факеле распыляемой под высоким напором жидкости. При этом остальными явлениями контактного взаимодействия капель жидкости и частиц пыли в активной зоне факела распыления можно пренебречь [6, 11-13].

Математическое моделирование. Поскольку принято осреднение скорости газа V_g и поступательного движения капель жидкости $V_{ж}$, длина активной зоны факела гидровихревого распыления может быть представлена с учетом [5, 6] в виде:

$$l_a = l_k + 3\tau_{ж\text{ ср}} \cdot V_g, \quad (1)$$

где $l_k = \tau_{ж\text{ ср}} \left(\sqrt{(V_{0\phi} - V_g)^2} \right)$ – длина инерционного пробега капли жидкости, m ; $\tau_{ж\text{ ср}}$ – среднее время релаксации капли жидкости; k – коэффициент аэродинамического сопротивления в уравнении Буссинеска движению капли жидкости с первоначальной скоростью $V_{0\phi}$ при отсутствии внешних сил; $V_{0\phi} = \sqrt{(V_{0ж} - V_g)^2 + 0,25\omega_{0ж}^2 d_k^2}$ – эффективная скорость движения вращающейся капли жидкости по спирали на выходе из гидровихревой форсунки, m/c ; $\omega_{0ж}$ – угловая скорость вращения капли жидкости на выходе из гидровихревой форсунки, c^{-1} .

На рис. 1 представлена расчетная схема движения капель жидкости на выходе из гидровихревой форсунки, один из вариантов конструкций которой запатентован [14].

Начальная поступательная скорость движения капли жидкости на выходе из гидровихревой форсунки $V_{0ж}$ в соответствии с уравнением Эйлера-Бернулли может быть определена по формуле

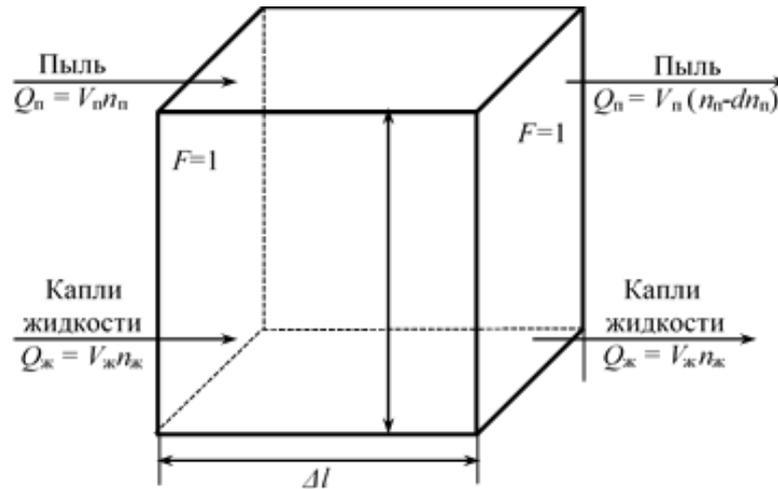


Рис. 2. Расчетная схема материального баланса в элементарном объеме факела:
 n_n – концентрация пыли на входе элементарного объема $\text{кг}/\text{м}^3$; V_n – скорость газа в сечении факела, $\text{м}/\text{с}$; dn_n – убыль концентрации пыли в элементарном объеме $\text{кг}/\text{м}^3$; $n_ж$ – объемное содержание жидкости в единице объема газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $V_ж$ – скорость капли в факеле, $\text{м}/\text{с}$; $Q_ж$ и Q_n расходы жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$) и пыли ($\text{кг}/\text{с}$) соответственно

Fig. 2. Analytical model for the material balance in the spray elementary volume: n_d – dust concentration at the inlet of an elementary volume, kg/m^3 ; V_d – gas velocity in the cross-section of the spray, m/s ; dn_d – decrease in the dust concentration in an elementary volume, kg/m^3 ; n_l – liquid hold-up in a gas volume unit, m^3/m^3 ; V_l – liquid droplet velocity in the spray, m/s ; Q_l and Q_d liquid (m^3/s) and dust (kg/s) flow rates respectively

$$V_{0ж} = k_{\text{ф}} \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (2)$$

где P – избыточное давление в гидровихревой форсунке, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность капли жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы канала гидровихревой форсунки, учитывающей уменьшение его фактического сечения, т. е. расхода жидкости.

Уравнение Буссинеска при надстоксовском движении дает возможность определять время релаксации капли жидкости и частицы пыли, связывая их с коэффициентом сопротивления газовой среды [6]. Экспериментальные исследования подтвердили, что сила сопротивления аэродинамического сопротивления в активной зоне факела распыляемой жидкости, т. е. при стоксовском режиме течения, изменяется существенно нелинейно с изменением числа Рейнольдса в отличие от линейного роста при стоксовском движении. По этой причине для построения математической модели эффективности гидровихревого пылеулавливания произведено осреднение коэффициента сопротивления и времени релаксации вращающихся капель жидкости на длине инерционного пробега в активной зоне факела распыляемой жидкости, определяемого критериями Эйлера и Рейнольдса [5, 6, 12].

Учитывая, что 99,8% кинетической энергии рассеивается в процессе инерционного торможения за время, равное трем значениям времени релаксации с достаточной точностью для расчета эффективности пылеулавливания, возможно использовать среднее значение времени релаксации в виде: $\tau_{\text{ср ж}} = \frac{\tau_{0ж}}{1 + 0,07 \text{Re}_{0\text{эф}}^{0,687}}$, где $\text{Re}_{0\text{эф}}$ – начальное эффективное значение критерия

Рейнольдса; $\tau_{0ж} = k \cdot \frac{2+3\mu'}{3+3\mu'} \cdot \frac{d_n^2 (\rho_n - \rho_r)}{18\mu_r}$ – время релаксации вращающейся капли жидкости при $\text{Re} < 1$,
 с ; $\mu' = \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_r}$ – относительная вязкость [5, 6, 12, 15].

Для определения порциальной концентрации частиц пыли в газовом потоке после гидровихревого пылеподавления в активной зоне факела распыляемой жидкости получим уравнение массового баланса в факеле длиной Δl элементарного объема с площадью поперечного сечения $F=1$ (рис. 2). Для построения математической модели баланса пылеподавления примем постоянным коэффициент поверхностного натяжения капель жидкости во всей активной зоне факела распыляемой жидкости, будем пренебрегать Броуновской

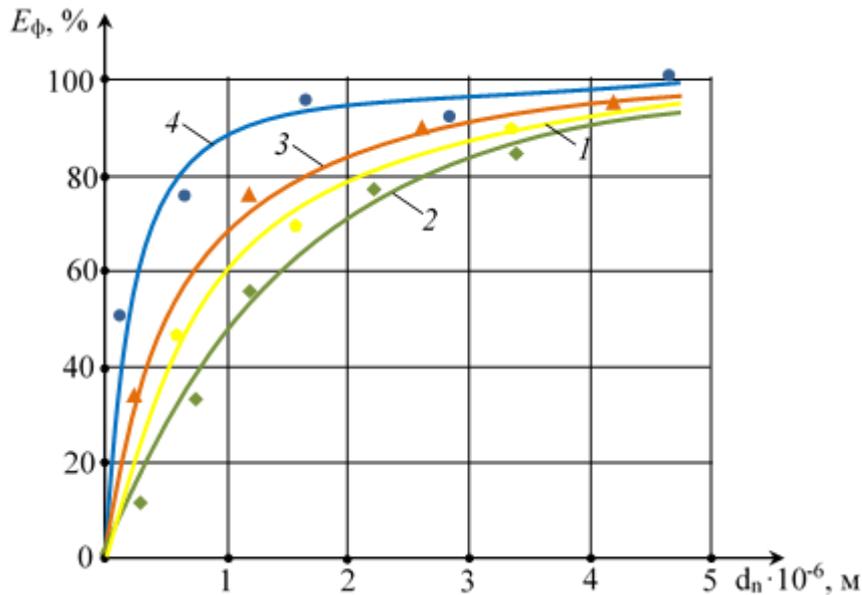


Рис. 3. График зависимости эффективности гидровихревого инерционного ортокинетического обеспыливания при:

1 – $\omega_{ж}=0$; 2 – $\omega_{ж}<10^3 \text{ с}^{-1}$; 3 – $\omega_{ж}=10^4 \text{ с}^{-1}$; 4 – $\omega_{ж}=10^5 \text{ с}^{-1}$

Fig. 3. Dependency diagram of the efficiency of hydrovortex inertial orthokinetic dedusting, where: 1 – $\omega_l=0$; 2 – $\omega_l<10^3 \text{ s}^{-1}$; 3 – $\omega_l=10^4 \text{ s}^{-1}$; 4 – $\omega_l=10^5 \text{ s}^{-1}$

диффузией частиц пыли и капель жидкости в процессе гидровихревой коагуляции. Для вышеуказанного элементарного объема в зоне факела гидровихревого обеспыливания уравнение массового баланса запишем в виде

$$V_r \cdot F \cdot n_{п} + \frac{3}{2} \left(\sqrt{\left(V_{ж} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_k^2} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right) \cdot \frac{dl}{d_k} n_{ж} \cdot n_{п} \cdot \eta_3 = V_r \cdot F \cdot (n_{п} - dn_{п}), \quad (3)$$

где $V_r \cdot n_{п}$, $V_r \cdot (n_{п} - dn_{п})$ – расход частиц пыли за ед. времени на входе и выходе элементарного объема соответственно, кг/с; $\frac{3}{2} \frac{n_{ж} \cdot n_{п} \cdot \eta_3}{d_k} \left(\sqrt{\left(V_{ж} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_k^2} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right) dl$ – переход частиц пыли на поверхность капель жидкости в единичном объеме за единицу времени, кг/с; η_3 – коэффициент захвата частиц пыли, определяемый критическим значением критерия Стокса $Stk_{кр}$; $\omega_{ж}$ – угловая скорость вращения капель жидкости, с^{-1} ; α – угол раскрытия факела, рад [5, 6].

Дифференцируя уравнение массового баланса для элементарного объема в гидрообеспыливающем факеле, получим уравнение снижения концентрации частиц пыли $n_{п}$ на длине факела $l_{ф}$ [16]:

$$\frac{dn_{п}}{n_{п}} = - \frac{3}{2 d_k \cdot V_r} \cdot \left(\sqrt{\left(V_{ж} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_k^2} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right) n_{ж} \cdot \eta_3. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что фактическая остаточная относительная концентрация частиц пыли в результате реализации механизма гидровихревого пылеподавления в факеле распыляемой жидкости с угловой скоростью вращения капель жидкости на выходе из гидровихревой форсунки $\omega_{ж}$ может быть записана в виде:

$$E_{\phi} = e^{- \frac{3 n_{ж} \eta_3 \left(\sqrt{\left(V_{ж} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right)^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_k^2} - V_r \cos \frac{\alpha}{4} \right)}{2 d_k \cdot V_r}} \cdot l_{к}. \quad (5)$$

Обсуждение результатов. Из анализа уравнения (5) видно, что эффективность гидровихревого пылеподавления в активной зоне факела распыляемой жидкости зависит от

коэффициента захвата частиц пыли, диаметра капель жидкости, длины инерционного пробега каплей жидкости в газовой среде. При фиксированной расходной скорости каплей жидкости $V_{ж}$ с увеличением угловой скорости их вращения $\omega_{ж}$ эффективность пылеулавливания существенно возрастает за счет присоединенного вихря, возникающего вокруг вращающейся капли и способствующего существенному снижению аэродинамического сопротивления. Кроме того, вращение капли жидкости приводит к диффузии завихренности в плоскости, перпендикулярной поступательной скорости ее движения. При этом коэффициентом диффузии завихренности является коэффициент динамической вязкости поступательного движения капли жидкости [16, 18]. В соответствии с законом Био-Савара все вышеуказанное формирует устойчивое циркуляционное движение, осью которого является вихревая нить траектории поступательного движения каплей жидкости, что в конечном счете способствует повышению эффективности гидровихревого пылеподавления [8, 13, 16].

На рис. 3 приведен график зависимости эффективности гидровихревого инерционного ортокинетического обеспыливания при различных значениях угловой скорости вращения каплей жидкости на выходе из гидровихревой форсунки.

Анализ графиков подтверждает, что гидровихревое обеспыливание при угловой скорости вращения каплей жидкости не менее 10^5 с^{-1} позволяет повысить эффективность пылеподавления с 96% до 99%. В диапазоне медианных размеров частиц пыли $d_{п} = (1-3) \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Выводы.

1. Применение гидровихревого обеспыливания за счет использования гидровихревых форсунок, обеспечивающих вращение каплей жидкости на выходе из них, позволяет увеличить активную зону факела распыляемой жидкости без увеличения энергетических затрат.

2. Увеличение скорости движения каплей жидкости по винтовой линии за счет вращения вокруг скорости поступательного движения при гидровихревом обеспыливании способствует увеличению числа Рейнольдса и, как результат, снижению коэффициента аэродинамического сопротивления, соответствующего коэффициенту уравнения Буссинеска.

3. Гидровихревое обеспыливание в диапазоне медианных размеров частиц пыли $d_{п} = (1-3) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ позволяет повысить эффективность обеспыливания за счет угловой скорости вращения каплей жидкости до 99%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцева О.В. Научное обоснование комплексного метода снижения пылевой и газовой опасностей выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – С. 315-325.
2. Мохначук И.И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. – 2008. – № 2. – С. 21-26.
3. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block / V.N. Makarov, V.Ya. Potapov, S.Ya. Davydov, N.V. Makarov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 38, № 3. – P. 288-292.
4. Эффективная локализация взрывов угольной пыли с использованием гидровихревой коагуляции / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, А.В. Лифанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.18, №2. – С.178-189.
5. Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Лифанов А.В. Эффективный способ утилизации мелкодисперсных техногенных отходов горно-металлургического производства // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 40-49.
6. Фролов А.В., Телегин В.А., Сечкерев Ю.А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – № 10. – С. 1-24.
7. Makarov V.N., Davydov S.Ya., Makarov N.V. Genesis of ecotechnology efficiency in the production of dust-forming materials. Refractories and industrial Ceramics. 2019. No 1. Vol. 60. P. 115-119.
8. Энергоэффективная технология локализации техногенных аварий в шахтах на базе математической модели гидровихревой коагуляции / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников, И.В. Свердлов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 118-127.

9. Шахтная аэрология пылевых аэрозолей в условиях гидровихревой коагуляции / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров, А.В. Угольников [и др.] // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 4(60). – С. 155-165.
10. Bautin S.P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. – 2014. – Т. 52, № 2. – С. 259-263.
11. Cecala A.B., Dust A.D. Control handbook for industrials minerals mining and processing / Office of Mine safety and Health Research. – 2012. – 159 с.
12. 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. – P. 012067.
13. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces // High temperature. – 2015. – P. 53, № 6. – P. 928-930.
14. Патент № 2737161 С1 Российская Федерация, МПК E21F 5/04, B05B 1/34, B05B 7/00. Способ гидровихревого кинематического пылеподавления и устройство для его реализации: № 2020112760: заявл. 31.03.2020; опубл. 25.11.2020 / В.Н. Макаров, Н.В. Макаров, А.В. Угольников [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».
15. Justification of environmental technologies and means for dust control of tailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants / V.I. Lyashenko, A. Gurin, F.F. Topolnii, N.A. Taran // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – № 4. – P. 8-17.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа. – 2003. – 840 с.
17. Модификация критериального уравнения гидровихревого пылеподавления на угольных шахтах / В.Н. Макаров, А.В. Угольников, А.Ю. Матеров [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 7. – С. 53-61.
18. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control // Applied Sciences (Switzerland). – 2017. – Т. 7, № 1. – P. 5-20.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-82-90

UDS 622.23.05:622.807

A MATHEMATICAL MODEL OF EFFECTIVE DEDUSTING UNDER HYDRO-VORTEX COAGULATION

Aleksandr V. Ugolnikov,

C. Sc. in Engineering, Ass. Prof., Head of the Dept., ugolnikov@yandex.ru

Ural State Mining University, 30 Kuibysheva Street, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation.



Article info

Received:
03 September 2021

Revised:
30 September 2021

Accepted:
25 October 2021

Abstract.

The urgency of the efficiency improvement of dedusting is specified by the growth of labor productivity at mining enterprises. Thus, we suggest technology and a mathematical model of hydro-vortex inertial orthokinetic hetero-coagulation which can raise the efficiency of high-pressure dust control. A mathematical model of hydro-vortex coagulation is developed, that enables us to analyze the kinematics and the dynamics of the interaction between a liquid droplet and a dust particle under the attached vortex action induced by rotating liquid drops. We obtained an equation of the relative dust concentration in a spray plume under hydro-vortex dedusting. Simulation data verification has affirmed the convergence of the dependency of the efficiency

Keywords: high-pressure dedusting, hydro-vortex nozzle, circulatory motion, attached vortex, dedusting efficiency

improvement of hydro-vortex dedusting on the angular velocity of the rotation of liquid droplets. It is shown that hydro-vortex dedusting enables to increase the efficiency of dust control up to 99 percent through the capture coefficient growth and the length of the spray active zone.

For citation Ugolnikov A.V. A mathematical model of effective dedusting under hydro-vortex coagulation. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.5 (147), pp. 82-90. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-82-90

REFERENCES

1. Skopintseva O.V. Nauchnoe obosnovanie kompleksnogo metoda snizheniya pylevoy i gazovoy opasnostey v yemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht [Scientific justification of the integrated method of reducing the dust and gas hazards of mining sites of coal mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2011. P. 315-325.
2. Mokhnachuk I.I. Problemy bezopasnosti na ugledobyvayushchikh predpriyatiyakh [Safety issues in coal mining enterprises]. *Ugol' [Coal]*. 2008. No. 2. P. 21-26.
3. Makarov V.N., Potapov V.Ya., Davydov S.Ya., Makarov N.V. A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block // *Refractions and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 38, No. 3. P. 288-292.
4. Makarov V.N., Kosarev N.P., Makarov N.V., Ugol'nikov A.V., Lifanov A.V. Effektivnaya lokalizatsiya vzryvov ugolnoy pyli s ispolzovaniyem gidrovihrevoy koagulyatsii [Effective localization of coal dust explosions using hydro vortex coagulation]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Seriya "Geologiya. Neftgazovoye i gornoye delo"* [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]. 2018. No. 2. Vol. 18. P. 178-189.
5. Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Makarov N.V., Lifanov A.V. Effektivnyy sposob utilizatsii melkodispersnykh tekhnogennykh otkhodov gorno-metallurgicheskogo proizvodstva [Efficient method of recycling of finely dispersed man-made wastes of mining and metallurgical production]. *Vestnik Zabayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Transbaikal State University Journal]. 2020. No. 2. Vol. 26. P. 40-49.
6. Frolov A.V., Telegin V.A., Sechkerev Yu.A. Osnovy gidroobespylivaniya [Basics of hydrodedusting]. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety]. 2007. No.10. P.1-24.
7. Makarov V.N., Davydov S. Ya., Makarov N. V. Genesis of ecotechnology efficiency in the production of dust-forming materials. *Refractories and industrial Ceramics*. 2019. No 1. Vol. 60. P. 115-119.
8. Makarov V.N., Makarov N.V., Ugol'nikov A.V., Sverdlov I.V. Energoeffektivnaya tekhnologiya lokalizatsii tekhnogennykh avariiv v shakhtakh na baze matematicheskoy modeli gidrovihrevoy koagulyatsii [Energy-efficient technology of technogenic accidents containment in mines based on a numerically simulated model of hydro vortex coagulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. 2019, No. 2. P. 118-127.
9. Kosarev N.P., Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Makarov N.V., Dyldin G.P. Shakhtnaya aerologiya pylevykh aerozoley v usloviyakh gidrovihrevoy koagulyatsii [Mine aerology of dust aerosols under conditions of hydro-vortex coagulation]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University]. 2020. No. 4 (60). P. 155-165.
10. Bautin S.P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // *High temperature*. 2014. Vol. 52, No. 2. P. 259-263.
11. Cecala A.B., Dust A.D. Control handbook for industrial minerals mining and processing. Office of Mine Safety and Health Research. 2012. 159 P.
12. 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. No. 1. P. 012067.
13. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G. Twisting of a fire vortex subject to gravity and Coriolis forces // *High temperature*. 2015. P. 53, No. 6. P. 928-930.
14. Makarov V.N., Makarov N.V., Ugolnikov A.V., Dyldin G.P., Churakov E.O. Sposob gidrovihrevo kinemacheskogo pylepodavleniya i ustroystvo dlya ego realizatsii [Hydrovortex Kinematic Dust Suppression Method and Device for Implementation Thereof]. Patent RU 2737161 C1. 25.11.2020. Bull. No. 33.
15. 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. No. 4. P. 8-17.
16. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. Moscow. Drofa. 2003. 840 P.
17. Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Materov A.Yu., Makarov N.V., Tauger V.M. Modifikatsiya kriterial'nogo uravneniya gidro vikhrevo pylepodavleniya na ugol'nykh shakhtakh [Modified criterion equation of hydro vortex dust suppression in coal mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2019. No. 7. P. 53-61.

18. Wu D., Yin K., Yin Q., Zhang X., Cheng J., Ge D., Zhang P. Reverse circulation drilling method based on a supersonic nozzle for dust control. Applied Sciences (Switzerland). 2017. Vol. 7, No. 1. P. 5-20.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).