

622.23.05

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОВИХРЕВОЙ ИНЕРЦИОННОЙ КОАГУЛЯЦИИ**

**В. Н. Макаров, Н. В. Макаров, А. В. Угольников,
Е. П. Афанасенко, М. Б. Носырев**

*Уральский государственный горный университет,
E-mail: mnikolay84@mail.ru, Карла Либкнехта, 42, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Представлена математическая модель гидровихревой инерционной кинематической коагуляции, существенно повышающая энергоэффективность локализации взрывов угольной пыли. С использованием теории присоединенных вихрей уточнена графическая модель взаимодействия капли жидкости и частицы взрывоопасной аэрозоли в зоне контакта в момент соударения в системе “жидкое–твердое”. Предложена и подтверждена гипотеза о снижении расклинивающего действия газовой среды в зоне контакта частиц взрывоопасных аэрозолей и капли жидкости за счет присоединенного вихря, обусловленного их вращением. Получены уравнения энергии, необходимой для полного поглощения частиц взрывоопасных аэрозолей, их минимального диаметра, а также краевого угла смачивания при гидровихревой инерционной коагуляции.

Экотехнология, пылеподавление, коагуляция, гидрофобность, циркуляция, угол смачивания, адгезия, энергия поглощения, присоединенный вихрь

DOI: 10.15372/FTPRPI20190319

Интенсификацию производства, внедрение новых методов, обеспечивающих эффективную добычу и переработку минерального сырья, сдерживает несовершенство технологий локализации взрывов угольной пыли [1]. Эффект пылеподавления взрывоопасных аэрозолей при высоконапорном гидрообеспыливании сводится к преодолению энергетического барьера в процессе столкновения капель жидкости с частицами пыли и переводу системы “твердое–жидкое” в более устойчивое состояние, т. е. определяется степенью коагуляции и способностью капель жидкости захватывать частицы пыли.

Гидрообеспыливание — один из наиболее распространенных методов предотвращения взрывов пылевых смесей, обеспечения санитарно-гигиенических условий в технологиях горного производства [1–4]. При высоконапорном гидрообеспыливании существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов сохранения санитарно-гигиенических условий и приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в недропользовании [5].

Актуальность совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания и внедрения экологического недропользования требует нового подхода к построению математической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции воднопылевого аэрозоля [6–8].

Важное значение в увеличении эффективности коагуляционного взаимодействия капель воды и частиц пыли имеет кинетическая энергия движения капель распыляемой воды, а не общий ее расход. Для низконапорного распыления жидкости влияние начального участка

факела на общую эффективность коагуляции не столь значительно из-за малой кинетической энергии диспергируемой струи. При высоконапорном гидрообеспыливанием динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды. Поскольку пылеподавление возможно только при непосредственном контакте капли жидкости с частицей пыли, то механизм именно этого процесса необходимо изучить с тем, чтобы разработать технологию и соответствующие технические средства, обеспечивающие наибольшие комфортные условия для его эффективного осуществления.

Технически коагуляция представляет собой результат столкновения двух фаз — жидкой и твердой. Соударение происходит при контакте капли жидкости и частицы пыли, при этом поглощение пыли жидкостью может и не наступить, так как для окончательного захвата и перехода в единую систему “капля жидкости — частица пыли” необходимо, чтобы силы инерции частиц пыли были больше сил адгезии и смачивания [5].

Степень взаимного проникновения двух фаз применительно к частицам микроразмера, соответствующим гидрофобности, т. е. эффективность коагуляции, зависит от характера протекания поверхностных явлений в зоне контакта, обусловленного влиянием относительной скорости капли воды и частицы пыли, их размера, поверхностного натяжения на границе раздела. Экспериментально установлено, что частицы пыли диаметром менее $5 \cdot 10^{-6}$ м практически гидрофобны [5]. При этом в структуре угольной пыли преобладают частицы размером $(1 - 200) \cdot 10^{-6}$ м. Таким образом, значительная часть наиболее взрывоопасной пыли гидрофобна, что существенно снижает эффективность систем высоконапорного гидродинамического пылеподавления [5].

Целью моделирования параметров системы “капля жидкости — частица пыли” в процессе предлагаемой вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции является исследование механизма кинематической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости [9, 10].

Фиксация частиц, приблизившихся к капле на расстояние действия адгезионных сил, зависит от краевого угла смачивания θ . Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних инерционных сил, которая соответствует кинетической энергии W_k взаимодействия в процессе их контакта. Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, если ее кинетическая энергия W_k будет больше или равна энергии поглощения $\Pi_{ж-г}$, которая соответствует сумме энергии адгезии $W_{ад}$ ($F_{ад}$ — сила адгезии), задаваемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания $W_{ж-г}$ ($F_{ж-г}$ — сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [5].

После преобразований, с учетом [5] получим:

$$d_{\text{п min}} = 24 \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2}, \quad (1)$$

где $d_{\text{п min}}$ — минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{г}}$ — плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м^3 ; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{г}} = V_{\text{п}}$ — скорость капли жидкости и скорость газа, равная скорости частицы пыли, м/с; $\delta_{ж-г}$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела двух сред “жидкость — газ”, Дж/м^2 ; θ — краевой угол смачивания на границе раздела двух сред “жидкость — газ”, рад.

Рассмотрен механизм целенаправленного управления краевым углом смачивания θ и кинетической энергией взаимодействия капель жидкости и частиц пыли W_k . С ростом краевого угла смачивания θ энергия поглощения снижается, что позволяет обеспечить заданный уровень эффективности обеспыливания при меньших энергозатратах либо расширить диапазон поглощения частиц пыли меньшего размера — повысить эффективность пылеподавления при заданных энергозатратах.

На базе известной модели кинетической коагуляции частицы взрывоопасной аэрозоли капель жидкости при $\omega_{\text{ж}} = 0$ [5] предложена графическая модель вихревой инерционной кинематической коагуляции, при которой капля жидкости вращается с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$, индуцируя в зоне контакта присоединенный вихрь (рис. 1).

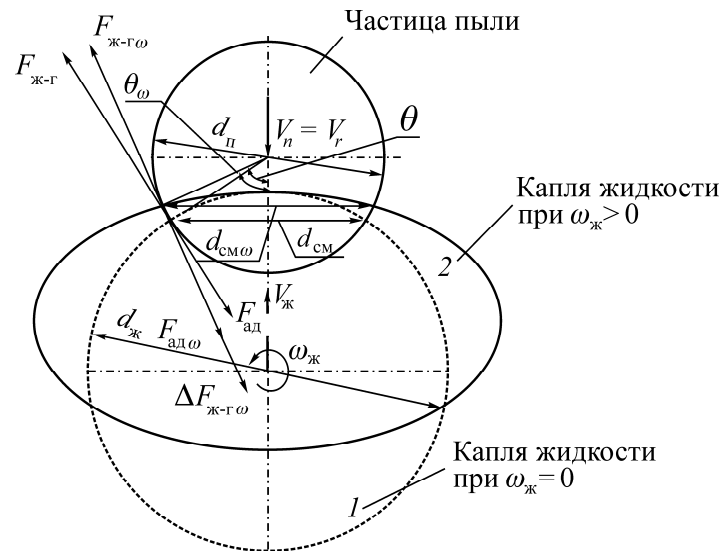


Рис. 1. Графическая модель вихревой кинематической коагуляции частицы пыли каплей жидкости: 1 — классическая инерционная ортокинети́ческая гетерокоагуляция, $\omega_{\text{ж}} = 0$; 2 — вихревая инерционная ортокинети́ческая гетерокоагуляция, $\omega_{\text{ж}} > 0$

Видно, что площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, определяемая диаметром периметра смачивания $d_{\text{см}}$, оказывает непосредственное влияние на величину краевого угла смачивания θ . Чем меньше радиус кривизны поверхности капли в зоне контакта, т. е. меньше ее размер, тем меньше краевой угол смачивания θ и тем больше потребуется затратить энергии для полного поглощения частицы пыли диаметром $d_{\text{п min}}$ каплей жидкости диаметром $d_{\text{ж}}$, определяемой поверхностной энергией отрыва и растекания.

Однако сам по себе размер капли не является решающим обстоятельством, так как при одинаковых объемах две капли могут иметь разные формы, обусловленные, в частности, скоростью вращения $\omega_{\text{ж}}$ и диаметром периметра смачивания $d_{\text{см}}$ при $\omega_{\text{ж}} = 0$ и $d_{\text{см}\omega}$ при $\omega_{\text{ж}} > 0$. При соударении частицы пыли с вращающейся со скоростью $\omega_{\text{ж}}$ каплей жидкости диаметр периметра смачивания увеличивается до $d_{\text{см}\omega}$ по сравнению с $d_{\text{см}}$ при $\omega_{\text{ж}} = 0$ (классической гетерокоагуляции). Чем больше значение краевого угла смачивания θ , тем меньше требуемая для поглощения частицы пыли кинетическая энергия капли жидкости, т. е. чем больше площадь контакта капли жидкости с частицей пыли, тем меньшую скорость необходимо сообщать каплям жидкости для обеспечения эффективного пылеподавления.

Таким образом, для снижения энергоемкости высоконапорного гидродинамического пылеподавления необходимо изменить кинематику взаимодействия капли жидкости и частицы пыли в зоне контакта. Это возможно за счет влияния энергии вихря, обусловленной вращением капли жидкости со скоростью $\omega_{\text{ж}}$ вокруг ее оси, совпадающей с вектором скорости $V_{\text{ж}}$ [5, 11, 12].

В [5] экспериментально установлено существование аэродинамического энергетического барьера, препятствующего переходу системы “жидкое – твердое” на более высокий энергетический уровень коагуляционного взаимодействия при низких значениях кинетической энергии взаимодействия капли жидкости и частицы пыли, что соответствует критическим значениям критерия Стокса, при которых невозможен захват частиц пыли.

При вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$ вокруг ее поверхности и в зоне контакта, согласно условию Гельмгольца – Бернулли, создается область разрежения — пониженного статического давления на величину удельной энергии $\Delta W_{\text{к}}$ присоединенного вихря, скорость которого определяется по формуле Био – Савара. Присоединенный вихрь, снижая статическое давление в зоне контакта капли жидкости с частицей пыли, увеличивает краевой угол смачивания до величины θ_{ω} , способствует снижению аэродинамического энергетического барьера [5, 12, 13]. В зоне контакта частица пыли будет двигаться по винтовой линии с углом спирали $\alpha = \text{arctg} d_{\text{п}} \sin \theta_{\omega_{\text{ж}}} / (V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})$ в глубь капли жидкости с поступательной скоростью $V_{\text{ж}} - V_{\text{г}}$, вращаясь при этом с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$ [13].

Изменение кинематических параметров, характеризующих взаимодействие частицы пыли и капли жидкости в зоне контакта при соударении, приводит к существенным изменениям фактических значений критериев Стокса и Рейнольдса, которые в условиях вихревой кинематической коагуляции находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{ж}\omega} &= \frac{d_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2 + 0.25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta}}{\mu_{\text{г}}}, \\ \text{Stk}_{\omega} &= \frac{d_{\text{п}}^2 (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}) \sqrt{(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2 + 0.25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta}}{18 \mu_{\text{г}} d_{\text{ж}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $d_{\text{ж}}$ — диаметр капли жидкости, м; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность капли жидкости, кг/м³; $\mu_{\text{г}}$ — коэффициент динамической вязкости газа, кг/мс.

Следовательно, вращательное движение капли жидкости увеличивает фактическое эффективное значение критериев Stk_{ω} и $\text{Re}_{\text{ж}\omega}$ в зоне контакта, способствуя снижению величины поверхностно-адгезионного энергетического барьера и критического уровня аэродинамического энергетического барьера [5].

Силу давления разрежения в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленную влиянием присоединенного вихря и равную снижению силы поверхностного натяжения, можно выразить уравнением

$$\Delta F_{\text{ж-г}\omega} = \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} \Gamma_{\omega} \omega_{\text{ж}} S_{\text{к}} S_{\text{п}}^{-1}, \quad (3)$$

здесь Γ_{ω} — циркуляция в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, м²/с; $S_{\text{к}}$ — площадь контакта, соответствующая площади смачивания, м²; $S_{\text{п}}$ — площадь поверхности частицы пыли, м².

Уравнение для дополнительной кинетической энергии, равной энергии вихря, присоединенного к вращающейся капле жидкости, с учетом (3) и рис. 1, уравнений Бернулли и Остроградского – Гаусса [13], запишется следующим образом:

$$\Delta W_{\kappa\omega} = \frac{\pi}{8} \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^3 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2. \quad (4)$$

Уравнение для силы депрессии в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, обусловленной влиянием присоединенного вихря, с учетом (3), (4) примет вид

$$\Delta F_{\text{ж-г}\omega} = \frac{\pi^2}{32} \rho_{\text{ж}} d_{\text{п}}^4 \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}. \quad (5)$$

Для вихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции минимальное значение энергии для полного поглощения с учетом уравнений (4) по аналогии с гетерокоагуляцией при $\omega_{\text{ж}} = 0$ запишется так:

$$\Pi_{\text{ж-г}\omega} = \Pi_{\text{ж-г}} - \Delta W_{\kappa\omega} = 2\delta_{\text{ж-г}} \cos \theta_{\omega}. \quad (6)$$

Учитывая (4), (6), уравнение для краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы при вращении капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{\text{ж}}$ представим в виде

$$\theta_{\omega} = \arccos \left(\cos \theta - \frac{\pi \rho_{\text{ж}} \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta} \right). \quad (7)$$

Согласно (1) и (7), получим минимальный диаметр частицы пыли, полностью поглощаемой под действием инерционных сил поступательного и вращательного движения:

$$d_{\text{п}\omega\text{min}} = \frac{\delta_{\text{ж-г}} \cos \arccos \left(\cos \theta - \frac{\pi \rho_{\text{ж}} \sin^4 \theta \omega_{\text{ж}}^2}{8 \delta_{\text{ж-г}} \cos \theta} \right)}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})(V_{\text{ж}} - V_{\text{г}})^2}. \quad (8)$$

По предложенной математической модели вихревой кинематической коагуляции на рис. 2 приведены результаты расчета изменения критических значений критерия Стокса в зависимости от угловой скорости вращения капель воды $\omega_{\text{ж}}$ диаметром $d_{\text{ж}} = 4 \cdot 10^{-6}$ м для абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли. Изолинии угловой скорости вращения капель жидкости в функции от критических значений критериев $Stk_{\text{кр}}$ и Re подтверждают существенное снижение как запрещающего уровня поверхностно-адгезионного энергетического барьера налипания частиц, так и критического уровня аэродинамического энергетического барьера.

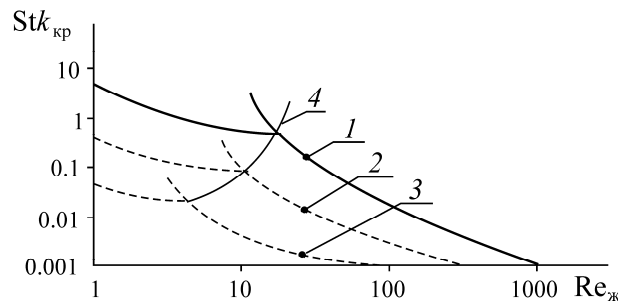


Рис. 2. Изолинии угловой скорости вращения капли воды в функции от критических значений критериев $Stk_{\text{кр}}$ и Re : 1 — $\omega_{\text{ж}} = 0$, $Stk_{\text{кр}} = 4.1 \cdot 10^{-2}$, $Re_{\text{ж}} = 20$, $d_{\text{min}} = 4 \cdot 10^{-6}$ м; 2 — $\omega_{\text{ж}} = 1.5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $Stk_{\text{кр}} = 8 \cdot 10^{-3}$, $Re_{\text{ж}} = 15$, $d_{\text{min}} = 3 \cdot 10^{-6}$ м; 3 — $\omega_{\text{ж}} = 2.5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $Stk_{\text{кр}} = 4.5 \cdot 10^{-3}$, $Re_{\text{ж}} = 6$, $d_{\text{min}} = 1.2 \cdot 10^{-6}$ м; 4 — зависимость $Stk_{\text{кр}}$ от угловой скорости вращения капли

При угловой скорости вращения капля жидкости $\omega_{\text{ж}} = 2.5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ критическое значение критерия Стокса снижается более чем в 4 раза, а критическое значение критерия Рейнольдса более чем в 3 раза, по сравнению с их значениями в условиях поступательного движения капля жидкости при $\omega_{\text{ж}} = 0$. Эффективные значения $Stk_{\text{кр}}$ и $Re_{\text{ж}}$, рассчитанные по формуле (2), на линии 4 (рис. 2) соответствуют их критическим значениям полного поглощения при $\omega_{\text{ж}} = 0$ по известным критериальным уравнениям.

Снижение энергетических барьеров в условиях вихревой коагуляции обусловлено увеличением значений критериев Стокса и Рейнольдса при вращении капли жидкости по сравнению с их значениями, рассчитанными без учета вращения капли жидкости при $\omega_{\text{ж}} = 0$. Снижение критерия Рейнольдса при вихревой инерционной коагуляции соответствует уменьшению расхода воды и потребного давления, а значит, повышению эффективности системы локализации взрывоопасных аэрозолей. Приведенные данные показывают, что при вихревом инерционном ортокINETическом гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капля жидкости и несмачиваемых частиц пыли коэффициент захвата $\eta_{\text{St(к)}}$ будет равен коэффициенту коагуляции $\eta_{\text{к}}$ при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т. е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости либо меньших размерах частицы пыли.

Проведенные экспериментальные исследования с достаточной для инженерного расчета точностью подтвердили результаты расчетов по предложенной математической модели.

ВЫВОДЫ

Вращение капли жидкости снижает расклинивающее действие газовой среды на границе “твердое–жидкое”, т. е. снижает величину потребной энергии полного поглощения $\Pi_{\text{ж-г}\omega}$, увеличивает поверхность смачивания и фактическое критическое значение критерия Стокса $Stk_{\text{кр}}$, рассчитанное по скорости поступательного движения капли жидкости, без учета скорости вращения.

Вихревая высоконапорная коагуляция способствует увеличению угла смачивания, уменьшению критического уровня аэродинамического энергетического барьера, что дает возможность на 20 % снизить расход воды и повысить эффективность пылеподавления до 99 % за счет снижения медианного размера частиц пыли по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием. Вихревое гидрообеспыливание позволяет уменьшить минимальный размер поглощаемой гидрофобной угольной пыли, снижая тем самым вероятность взрывов аэрозольных пылевых смесей и обеспечивая нормативные требования ПДК по запыленности воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Andrew B. Cecala and Andrew D.** Dust control handbook for industrials minerals mining and processing, Office of Mine Safety and Health Research, 2012. — 159 с.
2. **Makarov V. N. and Davydov S. Ya.** Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises, Springer Science + Business Media, N. Y., 2015, No. 2. — P. 59–63.
3. **Jay F. Colinet, James P. Rider, and Jeffrey M. Listak.** NIOSH / translation a document. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2010-110.pdf>

4. **Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., and Makarov N. V.** A method of additive aerodynamic calculation of the friction gear classification block (SCOPUS), *Refractions and Industrial Ceramics*, 2017, Vol. 38, No. 3. — P. 288–292.
5. **Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A.** Basics of hydro-dusting. *Life Safety*, 2007, № 10. — P. 1–24.
6. **Bautin S. P.** Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow, *High Temperature*, 2014, Vol. 52, No. 2. — P. 259–263.
7. **Recirculation filter** is key to improving dust control in enclosed cabs. *Technology News* 528. Pittsburgh: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 2007. — Publ., No. 2008–100.
8. **Lyashenko V. I., Gurin A. A., Topolnyy F. F., and Taran N. A.** Justification of environmental technologies and means for dust control of trailing dumps surfaces of hydrometallurgical production and concentrating plants, *Metallurgical and Mining Industry*, 2017, No. 4. — P. 8–17.
9. **Пат. 2601495 РФ** Способ создания подъемной силы и устройство для его осуществления / Н. В. Макаров, В. Н. Макаров; заявл.: 22.06.15, опубл. 10.11.16, Бюл. № 31.
10. **Bautin S. P., Krutova I. Yu., and Obukhov A. G.** Mathematical justification of the effect of the rotation of the earth on tornadoes and tropical cyclones, *Bul. of the National Research Nuclear University MEPhI*, 2017, Vol. 6, No. 2. — P. 101–107.
11. **Bautin S. G., Krutova I. Y., and Obukhov A. G.** Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces, *High temperature*, 2015. — Vol. 53, No. 6. — P. 928–930.
12. **Novakovskiy N. S. and Bautin S. P.** Numerical simulation of shock-free strong compression of 1d gas layer's problem subject to conditions on characteristic, *J. of Physics: Conf. Series*, 2017, Vol. 894, No. 1. — P. 012067.
13. **Лойцянский Л. Г.** *Механика жидкости и газа: учебник для вузов.* — 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.

*Поступила в редакцию 09/X 2018
После доработки 17/VI 2019
Принята к публикации 28/V 2019*