

Критерии подобия гидровихревой локализации взрывов на горных предприятиях

Николай Петрович КОСАРЕВ^{1,*}
 Владимир Николаевич МАКАРОВ^{1,**}
 Александр Владимирович УГОЛЬНИКОВ^{1,***}
 Артем Юрьевич МАТЕРОВ^{2,****}
 Николай Владимирович МАКАРОВ^{1,*****}
 Александр Викторович ЛИФАНОВ^{2,*****}

¹Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

²ООО «Научно-производственный комплекс «ОйлГазМаш», Россия, Подольск

Динамика совершенствования техники и технологии пылеподавления в горно-металлургическом комплексе России показывает их недостаточную эффективность в обеспечении санитарно-гигиенических условий, локализации негативных техногенных процессов. Дальнейшее повышение эффективности добычи и глубокой переработки минерального сырья существенно ограничено несовершенством способов и средств локализации и ликвидации взрывов пылевых аэрозолей.

Цель. С использованием теории Гельмгольца о постоянстве циркуляции скорости по замкнутому контуру, формулы Био–Савара, идентичности диффузии и дисперсии завихренности вязкой несжимаемой жидкости, правила Фурье и П-теоремы определены критерии подобия процесса циркуляционной гетерокоагуляции с использованием модифицированной математической модели гидровихревого пылеподавления для повышения эффективности локализации взрывов пыли и аэрозолей на горных предприятиях.

Методика исследований. Установлено, что при устойчивом вращении капель жидкости в условиях гидровихревого пылеподавления изменяются кинематика и динамика процесса взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гетерокоагуляции. При этом дифференциальные уравнения, описывающие движение частиц пыли и капель жидкости в случае гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия, гомогенны уравнениям, описывающим классическую гетерокоагуляцию. Получены уравнения для расчета эффективного краевого угла смачивания и минимального диаметра поглощаемых частиц пыли в функции от угловой скорости вращения капель жидкости. Определены критерии подобия, описывающие процесс гидровихревой ортокинетической гетерокоагуляции, построено критериальное уравнение, связывающее между собой критерии и индикаторы подобия в зависимости от угловой скорости вращения капель жидкости.

Результаты. Полученное критериальное уравнение подтвердило существенное влияние кинематики взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, что обусловлено снижением расклинивающего действия газовой среды в системе «твердое–жидкое», т. е. снижением потребной энергии для полного поглощения за счет увеличения поверхности смачивания. Установлено, что определяющими критериями подобия гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции являются критерии Рейнольдса и Стокса. Увеличение эффективного значения критериев Стокса и Рейнольдса в условиях гидровихревой коагуляции приводит одновременно к снижению его критического значения, что способствует уменьшению аэродинамического энергетического барьера. Сертификационные испытания с применением защищенных патентом вихревых форсунок подтвердили достаточность принятых критериев подобия гидровихревой инерционной ортокинетической гетерокоагуляции для подтверждения достоверности результатов прототипирования в лабораторных и промышленных условиях. Показано, что гидровихревая коагуляция существенно снижает размер диспергированного состава пыли, расход воды, повышая эффективность пылеподавления. Доказана возможность снижения минимального размера поглощаемой пыли в четыре раза, повышения эффективности пылеулавливания до 99 % при одновременном снижении расхода воды на 20 % по сравнению с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

Область применения. С использованием предложенной математической модели разработана конструкция гидровихревой форсунки устройства пылеподавления и предотвращения взрывов АСПВ–МДВ для локализации зон образования мелкодисперсных взрывоопасных пылевых смесей, предотвращения техногенных аварий на горных предприятиях.

Ключевые слова: гомогенность, критерии, индикаторы подобия, экотехнология, пылеподавление, гетерокоагуляция, гидрофобность, циркуляция, угол смачивания, адгезия, энергия поглощения, присоединенный вихрь, ортокинетика, коэффициент захвата, коэффициент поглощения, энергетический барьер налипания, сила депрессии.

Введение

Интенсификация производства, внедрение новых технологий обеспечивающих эффективную добычу и переработку минерального сырья, сдерживает несовершенство технологий пылеподавления и локализации взрывов угольной пыли. Причинами образования взрывоопасной пылевоздушной среды являются высокая твердость и хрупкость горных пород, приводящие к интенсивному пылеобразованию при отделении горных пород от массива и их транспортировании. Взрывы газа и пыли имеют существенные различия, 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 [1–4].

Травматизм от взрывов пыли на горных предприятиях с тяжелыми последствиями 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 пылевые аэрозоли [5].

Кроме того, пыль негативно влияет на организм человека, вызывая заболевание легких силикоз – при воздействии породной пыли, антракоз – при воздействии угольной пыли. Особенно активно действуют на легкие человека частицы пыли размером (1–6) · 10–6 м.

* iuggu-journal@yandex.ru

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

** uk.intelnedra@gmail.com

*** ugolnikov@yandex.ru

**** a.materov@oilgazmash.ru

***** mnikolay84@mail.ru

***** info@oilgazmash.ru

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 шахтах с высокой газообильностью и выбросами горных пород и газа 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.

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»; пылинка выпадает из воздуха и осажается на поверхности [6–8].

Совершенствование системы локализации вероятных взрывов угольной пыли – составная часть проблемы пылевзрывозащиты горных предприятий, решение которой – одна из важнейших задач в области техники безопасности и охраны труда на ближайшие годы [1, 3, 7].

Эффект пылеподавления в существенной мере 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. Однако при высоконапорном гидрообеспыливанием существенно растут энергозатраты на аэрацию, что снижает энергоэффективность процессов локализации техногенных аварий и, как результат, приводит к падению конкурентоспособности экотехнологии в недروпользовании [8].

Актуальность совершенствования технологии высоконапорного гидрообеспыливания, внедрения инновационной техники локализации взрывов потребовала нового подхода к построению математической модели инерционной ортокинетической гетерокоагуляции водно-пылевого аэрозоля [9, 10].

Определяющую роль в увеличении эффективности коагуляционного взаимодействия капель воды и частиц пыли играет именно кинетическая энергия движения капель распыляемой воды, а не общий ее расход. Динамически активный начальный участок с высокой кинетической энергией капель жидкости при высоконапорном гидрообеспыливанием играет определяющую роль в общей эффективности захвата и коагуляции пылевых частиц каплями воды.

В статьях [11, 12] предложена модель гидровихревого инерционного пылеподавления, исследован механизм ортокинетической коагуляции в условиях действия присоединенного вихря, индуцированного вращающейся каплей жидкости.

Методология исследований

На базе известной модели кинетической коагуляции частицы пыли каплей жидкости при $\omega_{ж} = 0$ в статье [11] разработана графическая модель гидровихревой ортокинетической коагуляции, построена система уровней, описывающая физический процесс коагуляции с участием дополнительной энергии присоединенного вихря.

Гидровихревая коагуляция позволяет управлять поверхностной энергией отрыва и растекания, обеспечивая взаимовлияние физических характеристик частиц пыли и капель жидкости с кинематическими параметрами, изменяющимися в связи с вращением капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{ж}$.

В зоне контакта частица пыли будет двигаться по винтовой линии с углом спирали $\alpha = \arctg \left[\frac{d_n \sin \theta \omega_{ж}}{(v_{ж} - v_r)} \right]$ в глубь капли жидкости с поступательной скоростью $v_{ж} - v_r$, вращаясь при этом с угловой скоростью $\omega_{ж}$ [12, 13].

Захват частицы пыли каплей жидкости произойдет при условии, когда ее кинетическая энергия $W_{ж}$ будет больше или равна энергии поглощения $P_{ж-г}$, соответствующей сумме энергии адгезии $W_{ад}$ ($F_{ад}$ – сила адгезии), определяемой удельной энергией отрыва, и энергии смачивания $W_{ж-г}$ ($W_{ж-г}$ – сила поверхностного натяжения), определяемой удельной энергией растекания [8].

С использованием предложенной графо-аналитической модели гидровихревого инерционного ортокинетического пылеподавления в статье [11] получено уравнение для минимального диаметра поглощаемой частицы пыли:

$$d_{\text{пo мин}} = \delta_{ж-г} \cos \theta \cdot \arccos \left(\cos \theta + \frac{\pi \rho_{ж} d_n^3 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2}{8 \delta_{ж-г} \cos \theta} \right) \left[(\rho_{п} - \rho_r) (v_{ж} - v_r)^{-2} \right], \tag{1}$$

где $d_{\text{пo мин}}$ – минимальный диаметр поглощаемой частицы пыли, м; $\rho_{п}$, ρ_r – плотность частицы пыли и газа соответственно, кг/м³; $v_{ж}$, $v_r = v_{п}$ – 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/м²; θ – краевой угол смачивания на границе раздела двух сред «жидкость–газ», рад.

С учетом изложенного уравнение для эффективной силы поверхностного натяжения, т. е. силы поверхностного натяжения, учитывающей энергию смачивания $W_{ж-г}$, определяемую силой поверхностного натяжения $F_{ж-г}$ и размером капли жидкости $d_{ж}$, физические характеристики соударяющихся частиц и дополнительную энергию, обусловленную влиянием присоединенного вихря, вызванного вращением капли жидкости в зоне контакта частицы пыли и капли жидкости, имеет вид:

$$F_{ж-г \omega} = F_{ж-г} - \Delta F_{ж-г \omega} = 2 \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{d_{ж}} \cdot \frac{\pi^2}{32} - \rho_{ж} d_n^4 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2 = 2 \frac{\delta_{ж-г} \cos \theta}{d_{ж}}. \tag{2}$$

Уравнение для эффективного краевого угла смачивания в зоне контакта жидкой и твердой фазы, с учетом дополнительной энергии обусловленной вращением капли жидкости с угловой скоростью $\omega_{ж}$ и формулы (1) имеет вид:

$$\theta_{\omega} = \delta_{ж-г} \arccos \left(\cos \theta + \frac{\pi \rho_{ж} d_n^3 \sin^4 \theta \omega_{ж}^2}{8 \delta_{ж-г} \cos \theta} \right). \tag{3}$$

Предложенная математическая модель гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции подтверждает существенное отличие механизма взаимодействия частицы пыли и капли жидкости в процессе столкновения, влияние

угловой скорости вращения капли жидкости не только на кинематические параметры взаимодействия, но и на энергетические характеристики.

В литературе отсутствуют данные об исследовании процесса гидровихревого инерционного ортокинетического ге-терокоагуляционного взаимодействия частиц пыли с каплями жидкости. Связанные с этим вопросы кинематики, динамики и физики этого явления до настоящего времени не имеют четкого понимания протекающих процессов и способов построения математических моделей.

В связи с изложенным большое значение приобретают методы экспериментального исследования на основе использования теории подобия и физического моделирования. Для проведения экспериментальных исследований и обоснованного использования полученных результатов необходимо установление критериев подобия, соответствующих конкретным физическим процессам гидровихревой коагуляции. В настоящее время нет единого представления о достаточном числе критериев подобия, определяющих взаимосвязь параметров в процессе инерционно-кинетического взаимодействия, тем более в условиях гидровихревой коагуляции. Весьма актуальной является задача построения критерия уравнения гидровихревого инерционного ортокинетического пылеподавления.

Экспериментальные исследования показывают, что основным критерием подобия физического процесса инерционной ортокинетической коагуляции является критерий Стокса Stk – «инерционный параметр», который в условиях гидровихревой коагуляции с учетом ранее сказанного можно представить в виде:

$$Stk_{\omega} = \frac{l_n}{d_j} = \frac{\tau_{\Pi} (v_j - v_r)_{эф}}{d_j} = \frac{\tau_{\Pi} \sqrt{(v_j - v_r)^2 + 0,25 \omega_j^2 d_n^2 \sin^2 \theta_{\omega}}}{d_j}, \quad (4)$$

где l_n – длина инерционного пробега частицы пыли в газовой среде, м.

Таким образом, «инерционный параметр» Стокса Stk_{ω} зависит от угловой скорости вращения капли жидкости ω_j , возростая с ее увеличением.

Процесс захвата капель жидкости частицы пыли происходит в два этапа. На первом этапе частица пыли соприкасается с каплей жидкости, либо прилипает к ней. На втором этапе происходит слияние частицы пыли с каплей жидкости, т. е. коагуляция. В связи с этим процесс инерционного гидровихревого ортокинетического столкновения в системе «твердое–жидкое» разделяют на два понятия: эффективность столкновения – «коэффициент захвата» K_s , т. е. вероятность достижения частицей пыли поверхности капли жидкости и «эффективность коагуляции» – «коэффициент коагуляции» K_k , т. е. вероятность необратимого поглощения частицы пыли каплей жидкости.

Коэффициент захвата K_s определяется отношением количества частиц пыли, коснувшихся поверхности капли жидкости в процессе гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения, к количеству частиц пыли, которые прошли бы через миделево сечение капли жидкости при условии, что траектории частиц пыли не искривляются в связи с изменением линий тока газа при обтекании капли жидкости. Многочисленными исследованиями установлено, что существует критическое значение критерия Стокса $Stk_{n,кр}$, при котором эффективность столкновения $K_s = 0$ [8].

При $Stk_n > Stk_{n,кр}$ коэффициент эффективности столкновения определяется по формуле:

$$K_s = \frac{Stk_n^2}{Stk_n + a}, \quad (5)$$

где $a = f(Stk_n, Re_j)$; Re_j – критерий Рейнольдса капли жидкости.

Таким образом, при $Stk_n < Stk_{n,кр}$ имеет место автомодельный режим гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения, при котором аэродинамический энергетический барьер не позволяет осуществить коагуляционное взаимодействие, т. е. переход системы «твердое–жидкое» в стабильное энергетическое состояние.

Учитывая сказанное, можно утверждать, что при гидровихревой коагуляции в системе «жидкое–жидкое» коэффициент захвата K_s равен коэффициенту коагуляции K_k . В случае гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия в системе «твердое–жидкое» процесс коагуляции происходит только при наличии достаточной кинетической энергии частицы пыли, которая должна преодолеть силы поверхностного натяжения, что подтверждает необходимость учета поверхностных явлений в процессе столкновения.

Для захвата гидрофобных частиц пыли каплей жидкости необходимо совершить работу внешних сил, к которым относятся указанная кинетическая энергия частиц пыли и капли жидкости при их соударении.

В условиях гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции вследствие интенсивного закручивания капли жидкости вокруг вектора скорости v_j с угловой скоростью ω_j существенно изменяются поверхностные явления в процессе столкновения. Вращение капли жидкости приводит к существенному уменьшению кривизны ее поверхности в зоне столкновения с частицей пыли, изменению параметров пограничного слоя, что, как показано ранее, способствует изменению угла смачивания θ_{ω} . Таким образом, при оценке уровней запрещающих энергетических барьеров, т. е. фактически установления зависимости эффективности коагуляции от параметров процесса столкновения, достаточно исследовать процесс изменения критических значений «инерционного параметра» $Stk_{n,кр}$ от угловой скорости вращения капли жидкости в условиях гидровихревой коагуляции.

Учитывая сказанное и формулу (2), уравнение преодоления запрещающего энергетического барьера при гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции можно записать в виде:

$$W_k \geq F_{ж-г} d_j = W_{ж-г} - \Delta W_{ж-г} = 2\delta_{ж-г} \cos \theta - \frac{\pi}{8} \rho_j d_n^3 \sin^4 \theta \cdot \omega_j^2 = 2\delta_{ж-г} \cos \theta_{\omega}. \quad (6)$$

После соответствующих преобразований, с учетом уравнений (4), (5), (11) выражения для критического значения «инерционного параметра» Стокса получим в виде:

$$Stk_{\text{пкп}} = \tau_{\text{п}} \sqrt{\frac{24 \delta_{\text{жг}} \cos \theta_{\omega}}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}) d_{\text{п}}}} d_{\text{ж}}^{-1}. \tag{7}$$

Таким образом, с учетом изложенного задача определения эффективности коагуляции в условиях гидровихревого инерционного ортокинетического столкновения заключается в установлении зависимости критического значения инерционного критерия Стокса $Stk_{\text{пкп}}$ от угловой скорости вращения капли $\omega_{\text{ж}}$ жидкости и диаметра пылинки $d_{\text{пкп}}$.

Из анализа формул (3), (7) вытекает, что с увеличением угловой скорости вращения частицы пыли увеличивается угол смачивания θ_{ω} , что приводит к увеличению критического значения критерия Стокса, позволяя тем самым обеспечить эффективное поглощение частиц пыли меньшего диаметра.

Гидровихревая инерционная ортокинетическая коагуляция частиц пыли и капель жидкости в динамически активном сегменте высоконапорного распыления происходит в потоке газа при больших числах Рейнольдса для капли жидкости. Для подобных условий в настоящее время нет единого мнения о достаточном числе критериев подобия, определяющих взаимозависимость параметров, характеризующих процесс коагуляции. Многие авторы полагают, что критерий Стокса не является единственным, определяющим эффективность инерционного захвата частицы пыли каплей жидкости, а тем более ее полного поглощения [8].

Для подтверждения факта, что зависимости критерия Стокса от критерия Рейнольдса капли жидкости и частицы пыли, построим критериальное уравнение взаимосвязи «инерционного параметра» Stk_{ω} в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции с индикаторами подобия.

Согласно правилу Фурье, слагаемые уравнений, описывающих физические явления, имеют одинаковую размерность. Следовательно, можно утверждать, что ранее указанные дифференциальные уравнения движения частиц в вязкой несжимаемой среде являются гомогенными. Применение П-теоремы в условиях отсутствия полной информации о механизме гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции базируется на следствии второго дополнительного положения В. А. Веникова о подобии сложных систем, согласно которым, «системы остаются подобными после упрощений при условии, что эти упрощения были проведены в них соответственно одинаково» [13].

Учитывая сказанное, в качестве основных независимых параметров, определяющих механизм гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции, примем:

- геометрические параметры $d_{\text{п}}, d_{\text{ж}}, d_{\text{см}}$;
- кинематические параметры $\sqrt{(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}})^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta} \omega = (v_{\text{ж}} - v_{\text{г}})_{\text{эф}}, \omega_{\text{ж}}$;
- динамические параметры $(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}), \rho_{\text{г}}, \mu_{\text{г}}$.

Для построения критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции запишем взаимозависимость вышеуказанных независимых переменных в форме безразмерной степенной зависимости:

$$Stk_{\text{пкп}} = k d_{\text{ж}}^{\alpha} d_{\text{п}}^{\beta} \mu_{\text{г}}^{\delta} \rho_{\text{г}}^{\gamma} (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})^z \left(\sqrt{(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}})^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta} \right)^x (\omega_{\text{ж}})^j d_{\text{см}}^{\psi}. \tag{8}$$

Для нахождения критериев подобия составим полную матрицу размерностей независимых параметров.

		$d_{\text{ж}}$	$d_{\text{п}}$	$\mu_{\text{г}}$	$\rho_{\text{г}}$	$\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}}$	$\sqrt{(v_{\text{ж}} - v_{\text{г}})^2 + 0,25 \omega_{\text{ж}}^2 d_{\text{п}}^2 \sin^2 \theta}$	$\omega_{\text{ж}}$	$d_{\text{см}}$	
$\ M\ =$	M	1	1	-1	-3	-3	1	0	1	
	L	0	0	1	1	1	0	0	1	
	T	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	

Ранг матрицы $\|M\| = 3$, т. е. количество независимых переменных равно трем.

Количество чисел подобия, т. е. безразмерных комплексов, ключающих в себя и критерии подобия в соответствии с П-теоремой, составит:

$$K_{\pi} = n - m = 8 - 3 = 5, \tag{10}$$

где n – число размерных физических величин, $n = 8$; m – число независимых размерностей, $m = 3$.

Показатели степени $\alpha, \beta, \delta, \gamma, z, x, \varphi, \psi$ в критериальном уравнении по элементам матрицы (9) составляют однородную систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \alpha + \beta - \gamma - 3\delta - 3z + x + \psi = 0; \\ \gamma + \delta + z = 0; \\ \gamma + x + j = 0. \end{cases} \tag{11}$$

В соответствии с решением системы уравнений (11) получаем матрицу чисел подобия

$$\|M_{\pi}\| = \begin{matrix} & d_{ж} & d_{п} & \mu_{г} & \rho_{г} & \rho_{п} - \rho_{г} & \sqrt{(v_{ж} - v_{г})^2 + 0,25 d_{см}^2 \omega_{ж}^2} & \omega_{ж} & d_{см} \\ \pi_1 & 0 & 2 & -2 & 2 & 0 & 2 & 2 & -1 \\ \pi_2 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ \pi_3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ \pi_5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ & \alpha & \beta & \gamma & \gamma & z & x & j & \psi \end{matrix} \quad (12)$$

Раскрывая соответствующие определители матрицы (12), построим пять безразмерных комплексов, представляющих собой индикаторы подобия:

$$\pi_1 = \frac{\rho_{г}^2 d_{п}^2 \left((v_{ж} - v_{г})^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{см}^2 \right)}{\mu_{г}^2} = Re_{п}^2, \quad (13)$$

где $Re_{п}$ – критерий Рейнольдса для частицы пыли;

$$\pi_2 = \frac{\mu_{г}}{d_{ж} \rho_{г} \sqrt{(v_{ж} - v_{г})^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{см}^2}} = Re_{ж}^{-1}, \quad (14)$$

где $Re_{ж}$ – критерий Рейнольдса для капли жидкости;

$$\pi_3 = \frac{\rho_{п} - \rho_{г}}{\rho_{г}} = \pi_{\rho} = Ard_{ст}, \quad (15)$$

где $Ard_{ст}$ – статический критерий Архимеда;

$$\pi_4 = \frac{\omega_{ж} d_{п} \sin \theta_{\omega}}{2 \sqrt{(v_{ж} - v_{г})^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{п}^2} \sin \theta_{\omega}^2} = \pi_k, \quad (16)$$

где π_k – кинематический критерий подобия;

$$\pi_5 = \sin \theta_{\omega} = \pi_{\tau}, \quad (17)$$

где π_{τ} – геометрический критерий подобия.

Коэффициент пропорциональности k в уравнении (8) определяем из выражения для $\tau_{п} = \frac{d_{п}^2 (\rho_{п} - \rho_{г})}{18 \mu_{г}}$ [8].
С учетом изложенного и формул (13-17) уравнение (8) запишем в критериальной форме:

$$Stk_{п\omega} = \frac{l_{п}}{d_{ж}} = \frac{Re_{п}^2}{18 Re_{ж}} Ard_{ст} \pi_k \pi_{\tau} = \frac{Re_{п} d_{п}}{18 d_{ж}} Ard_{ст} \pi_k \pi_{\tau} = \frac{\tau_{п} \sqrt{(v_{ж} - v_{г})^2 + 0,25 \omega_{ж}^2 d_{п}^2} \sin \theta_{\omega}^2}{d_{ж}} = idem. \quad (18)$$

На рис. 1 приведены результаты расчета по предложенным критериальным уравнениям вихревой инерционной ортокинетики коагуляции изменения критических значений «инерционного параметра» Стокса $Stk_{п\omega,кр}$ в зависимости от угловой скорости вращения капель воды $\omega_{ж}$ диаметром $d_{ж} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м и диаметра частиц угольной пыли $d_{п\omega}$ при значении критерия Рейнольдса для капли жидкости $Re_{ж} = 20$.

Анализ графиков, приведенных на рис. 1, подтверждает аналитический вывод об определяющей роли критерия Стокса в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, существовании автотемпературного режима гидровихревой коагуляции для диаметров угольной пыли $d_{п} < 5 \cdot 10^{-6}$ м. По мере увеличения угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{ж} > 0$ критические значения «инерционного параметра» $Stk_{п\omega,кр}$ существенно уменьшаются, что подтверждает эффективность полного поглощения мелкодисперсных частиц пыли. При угловой скорости вращения капли жидкости $\omega_{ж} = 400 \text{ с}^{-1}$ критическое значение Стокса снижается более чем в 200 раз, позволяя полностью поглощать частицы пыли диаметром $5 \cdot 10^{-7}$ м.

Снижение энергетического барьера при гидровихревой коагуляции обусловлено снижением потребной кинетической энергии в связи со снижением энергии поверхностного натяжения, что подтверждается формулой (6) и уравнением (18). Основным фактором снижения «инерционного параметра» $Stk_{п\omega,кр}$ является увеличение угла смачивания θ_{ω} при гидровихревом взаимодействии частицы пыли с вращающейся каплей жидкости, что подтверждается формулами (2), (3) и уравнением (18). Кроме того, по мере снижения диаметра частиц диспергированной угольной пыли снижение «инерционного параметра» $Stk_{п\omega,кр}$ достигается кинематически за счет вращательного движения капли воды согласно

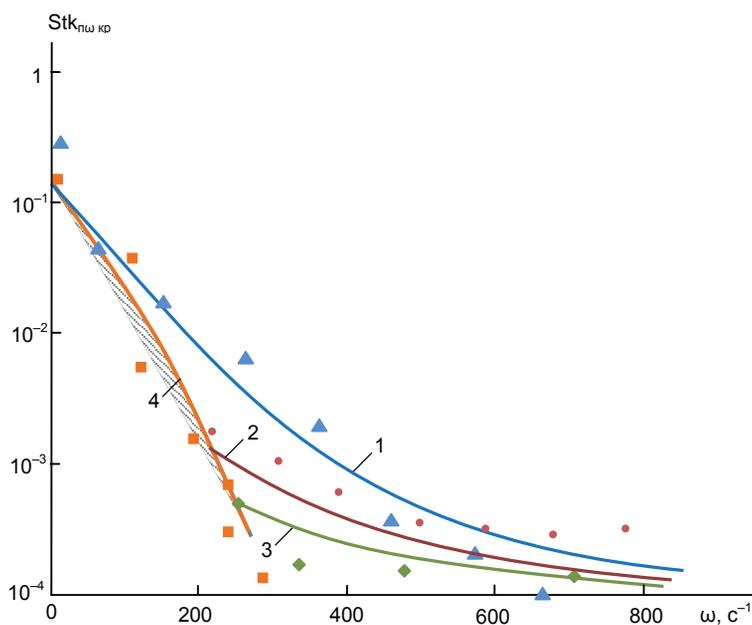


Рисунок 1. Зависимость критических значений критерия Стокса от угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_{ж}$ для различных диаметров частиц пыли. 1 – $d_p = 5 \times 10^{-6}$ м; 2 – $d_p = 2 \times 10^{-6}$ м; 3 – $d_p = 5 \times 10^{-7}$ м; 4 – граница автомодельности гидровихревой коагуляции.

Figure 1. The dependence of the critical values of the Stokes criterion on the angular velocity of rotation of liquid droplets $\omega_{ж}$ for various diameters of dust particles. 1 – $d_p = 5 \times 10^{-6}$ m; 2 – $d_p = 2 \times 10^{-6}$ m; 3 – $d_p = 5 \times 10^{-7}$ m; 4 – the boundary of self-similarity of vortex coagulation.

уравнениям (3), (7), способствующего уменьшению расклинивающего действия газа при контакте частиц пыли и капель воды, что обеспечивает полное поглощение частиц пыли меньшего диаметра по сравнению с классической коагуляцией.

При угловой скорости вращения капель жидкости $\omega_{ж} = 600 \text{ c}^{-1}$ значение $Stk_{п\omega_{кр}}$ снижается более чем в сто двадцать раз по сравнению с его критическим значением, обеспечивающим полное поглощение частиц пыли в условиях поступательного движения капель жидкости, т. е. при $\omega_{ж} = 0$. При этом критическое значение критерия Стокса $Stk_{п\omega_{кр}}$, рассчитанное по формуле (12) с учетом формул (2)–(5), соответствуют с достаточной точностью его критическому значению полного поглощения, полученному экспериментальными исследованиями в условиях, определяемых критериальным уравнением (18).

Снижение величины критерия Рейнольдса для капель жидкости при гидровихревом высоконапорном гидрообеспыливанием соответствует уменьшению скорости поступательного движения капли жидкости $v_{ж}$, т. е. уменьшению расхода воды, повышая ресурсоэффективность системы пылеподавления. Приведенные данные показывают, что при вихревом инерционном ортокинетическом гетерокоагуляционном взаимодействии вращающихся капель жидкости и не смачиваемых частиц пыли коэффициент захвата η_{Stk} будет равен коэффициенту коагуляции η_k при существенно меньших значениях критерия Рейнольдса, т. е. при меньших скоростях поступательного движения капли жидкости, либо меньших размерах частицы пыли.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достаточную достоверность критериального уравнения гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции для применения его в целях обеспечения идентичности результатов моделей испытаний с реальными физическими процессами пылеподавления. Результаты расчетов по предложенной математической модели критериальных уравнений показали высокую эффективность гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции, позволившей на 25 % снизить расход воды, уменьшить минимальный размер поглощения абсолютно гидрофобных частиц угольной пыли до $5 \cdot 10^{-7}$ м, повысить эффективность пылеподавления до 99 % в сравнении с классическим высоконапорным гидрообеспыливанием.

Выводы

1. Критериальные уравнения с достаточной точностью подтверждают гомогенность уравнений, описывающих процесс гидровихревого инерционного ортокинетического взаимодействия в системе «твердое–жидкое».

2. Вращение капель жидкости снижает расклинивающие действия газа в зоне контакта частиц пыли и капель жидкости, снижая величину потребной кинетической энергии полного поглощения частиц пыли, увеличивает эффективное значение критериев Стокса и Рейнольдса, способствует снижению их критических значений.

3. Результаты расчета критического значения «инерционного параметра» $Stk_{п,кр}$ по предложенным математическим моделям и экспериментальным исследованиям в условиях достижения максимальных значений коэффициента эффективности коагуляции $K_k = 1$ показали достаточную сходимость.

4. Критические значения инерционного показателя критерия Стокса в процессе гидровихревой инерционной ортокинетической коагуляции увеличиваются с увеличением угловой скорости вращения $\omega_{ж}$ капель жидкости и увеличиваются с уменьшением диаметра пылинок $d_{п}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мохначук И. И. Проблемы безопасности на угледобывающих предприятиях // Уголь. 2008. № 2. С. 21–26.
2. Reed W. R., Organiscak J. A. Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck // Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28–March 2, Salt Lake City, Utah. 2005. P. 147–153.
3. Handbook for dust control in mining / Ed. F. N. Kissell. Pittsburgh, PA, U.S.: Pittsburgh Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2003-147 (IC 9465). 2003. 132 p. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1041.html>
4. Джигрин А. В., Горлов Ю. В., Чигрин В. Д. Автоматическая система взрывоподавления – локализации взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли в подземных горных выработках угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 8. С. 22–26.
5. Толченкин Ю. А., Чекветадзе Ф. А., Разумняк Н. Л. Роль переподготовки руководителей и специалистов в повышении промышленной безопасности на шахтах отрасли // Уголь. 2007. № 10. С. 41–44.
6. 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://dx.doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7>
7. Либеецкий К. Пылевые опасности в горнодобывающей промышленности. Польша, Катовице: Главный институт горного дела, 2004. 486 с.
8. Фролов А. В., Телегин В. А., Сечкерев Ю. А. Основы гидрообеспыливания // Безопасность жизнедеятельности. 2007. № 10. С. 1–24.
9. Bautin S. P. Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow // High temperature. 2014. Vol. 52, issue 2. P. 259–263. <https://dx.doi.org/10.1134/S0018151X14020035>
10. Способ создания подъемной силы и устройства для его осуществления: пат. 2601495 Рос. Федерация / Макаров Н. В., Макаров В. Н. заявл. 22.06.15; опубл. 11.10.16.
11. 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.
12. 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.
13. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высш. школа, 1966. 487 с.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2019 г.

Similarity parameters for hidro-vortex blast isolation in mining enterprises

Nikolay Petrovich KOSAREV^{1,*}

Vladimir Nikolaevich MAKAROV^{1,**}

Aleksandr Vladimirovich UGOL'NIKOV^{1,***}

Artem Yur'evich MATEROV^{2,****}

Nikolay Vladimirovich MAKAROV^{1,*****}

Aleksandr Viktorovich LIFANOV^{2,*****}

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²LLC "NPC "OilGasMash", Podolsk, Russia

Dynamics of technological advancements and dust suppression techniques in the mining and metallurgical sector of Russia shows their insufficient effectiveness in ensuring sanitary and hygienic conditions, and containment negative technological processes. A further increase in the efficiency of extraction and deep processing of mineral raw materials is significantly limited by the imperfection of methods and means of containment and elimination of dust aerosol explosions.

Purpose. Similarity parameters for the process of circulating heterocoagulation using a modified mathematical model of hydro-vortex dust suppression are determined to increase the efficiency containment of explosions of dust and aerosols in mining enterprises using the Helmholtz theory of constancy of speed circulation over a closed loop, the Biot-Savard formula, the identity of diffusion and dispersion of the vorticity of a viscous incompressible fluid, the Fourier rule and the \square -theorem,

Research Methodology. It was established that with steady rotation of liquid droplets under conditions of hydro-vortex dust suppression, the kinematics and dynamics of the process of interaction of dust particles and liquid droplets during heterocoagulation change. In this case, the differential equations describing the motion of dust particles and liquid droplets in the case of a hydro-vortex inertial orthokinetic interaction are homogeneous to the equations describing classical heterocoagulation. Equations are obtained for calculating the effective contact angle and the minimum diameter of the absorbed dust particles as a function of the angular velocity of rotation of the liquid droplets. Similarity parameters are defined that describe the process of hydro-vortex orthokinetic heterocoagulation, a criterion equation is built that links the similarity parameters and similarity indicators depending on the angular velocity of rotation of the liquid droplets.

Results. The obtained criterion equation confirmed the significant influence of kinematics of dust particles interaction and liquid droplets during the hydro-vortex heterocoagulation, which is due to a decrease in the proppant action of the gaseous medium in the solid-liquid system, that is, a decrease in the energy required for complete absorption due to an increase in the wetting surface. It was determined that the Reynolds and Stokes criteria are the determining criteria for the similarity of a hydro-vortex inertial orthokinetic heterocoagulation. An increase in the effective value of the Stokes and Reynolds criteria under conditions of hydro-vortex coagulation leads simultaneously to a decrease in its critical value, which contributes to a decrease in the aerodynamic energy barrier. Certification tests using patent-protected vortex nozzles confirmed the sufficiency of the accepted criteria for similarity of a hydro-vortex inertial orthokinetic heterocoagulation to confirm the reliability of the results of prototyping in laboratory and industrial conditions. It is shown that hydro-vortex coagulation significantly reduces the size of the dispersed dust composition, water consumption, increasing the efficiency of dust suppression. The possibility of reducing the minimum size of the absorbed dust by four times, increasing the efficiency of dust collection up to 99% while reducing water consumption by 20% compared with classical high-pressure hydrodedustry, is proved.

Application area. Using the proposed mathematical model, the design of a hydraulic vortex nozzle of a dust suppression and explosion prevention device ASPV – MDV was developed to localize the zones of formation of finely dispersed explosive dust mixtures and to prevent technological accidents at mining enterprises.

Keywords: homogeneity, parameters, indicators of similarity, environmental technology, dust suppression, heterocoagulation, hydrophobicity, circulation, angle of contact, adhesion, absorption energy, lift vortex, orthokinetics, capture ratio, absorption coefficient, energy barrier adhering, depression intensity.

REFERENCES

1. Mokhnachuk I. I. 2008, Security problems in coal mining enterprises. *Ugol'* [Coal], no. 2, pp. 21–26. (*In Russ.*)
2. Reed W. R., Organiscak J. A. 2005, Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Annual Meeting, February 28–March 2, Salt Lake City, Utah, pp. 147–153.
3. 2003, Handbook for dust control in mining. Ed. F. N. Kissell. Pittsburgh, PA, U.S.: Pittsburgh Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2003-147 (IC 9465), 132 p. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1041.html>
4. Dzhigrin A. V., Gorlov Yu. V., Chigrin V. D. 2003, Automatic system for explosion suppression - localization of methane-air mixture explosions and coal dust in underground coal mine workings. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], no. 8, pp. 22–26 (*In Russ.*)
5. Tolchenkin Yu. A., Chekvetadze F. A., Razumnyak N. L. 2007, The role of retraining managers and experts in improving industrial safety in the mines of the industry. *Ugol'* [Coal], no. 10, pp. 41–44. (*In Russ.*)
6. 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://dx.doi.org/10.1007/s11148-015-9791-7>
7. Libetskiy K. 2004, *Pylevyvye opasnosti v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Dust hazards in the mining industry]. Poland, Katowice. Main Institute of Mining, 486 p.
8. Frolov A. V., Telegin V. A., Sechkerev Yu. A. 2007, Fundamentals of water dedusting. *Bezopasnost' zhiznedeysel'nosti* [Life safety], no. 10, pp. 1–24. (*In Russ.*)
9. Bautin S. P. 2014, Mathematical simulation of the vertical part of an upward swirling flow. *High temperature*, vol. 52, issue 2, pp. 259–263. <https://dx.doi.org/10.1134/S0018151X14020035>

* iuggu-journal@yandex.ru

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

** uk.intelnedra@gmail.com

*** ugolnikov@yandex.ru

**** a.materov@oilgazmash.ru

***** mnikolay84@mail.ru

***** info@oilgazmash.ru

10. Makarov N. V. 2016, Sposob sozdaniya pod"yemnoy sily i ustroystva dlya yego osushchestvleniya [Method of creating a raising force and device for its implementation]. Patent RF no. 2601495.
11. Makarov V. N., Kosarev N. P., Makarov N. V., Ugolnikov A. V., Lifanov A. V. 2018, Effective localization of coal dust explosions using hydro-vortex coagulation. *Vestnik PNIPU* [Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering]. *Geology*, vol. 18, no. 2, pp. 178–189. (In Russ.)
12. Makarov V. N., Makarov N. V., Potapov V. V., Gorshkova E. M. 2018, A promising way to increase the efficiency of high-pressure hydrodedusting. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of the Transbaikal State University], vol. 24, no. 5, pp. 13–20. (In Russ.)
13. Venikov V. A. 1966, *Teoriya podobiya i modelirovaniya primenitel'no k zadacham elektroenergetiki* [The theory of similarity and modeling as applied to the tasks of the electric power industry]. Moscow, 487 p.

The article was received on March 12, 2019